

ÉLABORATION D'UN CALCUL STANDARDISÉ DE LA VULNÉRABILITÉ AUX VAGUES DE CHALEUR SOUS
L'ANGLE DE LA SANTÉ PUBLIQUE

Par
Jean-Nicolas Côté

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Elisabeth Levac

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Mai 2020

SOMMAIRE

Mots clés : analyse en composante principale, capacité à faire face, capacité d'adaptation, changements climatiques, plan d'adaptation, santé publique, sensibilité, système d'information géographique, vague de chaleur, vulnérabilité

Afin d'atténuer les impacts délétères des changements climatiques sur les communautés vulnérables, il est essentiel de bien quantifier le phénomène pour adopter les stratégies appropriées. De nombreux plans d'adaptation aux changements climatiques s'appuient sur des matrices pour établir la vulnérabilité, mais ces dernières sont sommaires et manquent de précision. Cette évaluation peut être optimisée avec une approche qui combine les systèmes d'information géographique et une analyse en composante principale. L'aléa des vagues de chaleur et ses conséquences sur la santé publique a été choisi pour étudier l'équation $V = S - CA$, où V est la vulnérabilité, S la sensibilité et CA la capacité d'adaptation (ou la capacité à faire face).

Le présent essai a développé un calcul de vulnérabilité avec 14 indicateurs de sensibilité divisés en 4 composantes qui sont pondérées. Les résultats sont regroupés par la méthode du *Jenks Natural Breaks*. La capacité d'adaptation se base sur une équation générale qui lie les indicateurs de sensibilité et leurs impacts sur la communauté. Cette approche a été comparée avec celle de l'Atlas de la vulnérabilité, un projet conçu par des chercheurs de l'Université Laval. Leur méthode repose sur 13 indicateurs de sensibilité divisés en 4 composantes qui ne sont pas pondérées. Les résultats sont regroupés par la méthode des quintiles. La capacité à faire face se base sur 7 indicateurs qui sont divisés en 2 composantes. Malheureusement, le manque de données probantes complexifie la conception d'un calcul standardisé. Ainsi, en l'absence d'une relation claire entre la mortalité, la morbidité et les divers indicateurs de la vulnérabilité, il est impossible de déterminer une approche optimale.

Il est recommandé pour la majorité des organisations qui élaborent des plans d'adaptation de se fier à l'Atlas de la vulnérabilité, puisque c'est un outil clé en main avec une solide base scientifique. Pour celles qui nécessitent un calcul personnalisé, une démarche exhaustive est proposée. Enfin, des pistes de réflexion sont lancées aux chercheurs afin d'approfondir les connaissances qui reposent principalement sur des avis d'experts et des études avec une puissance statistique limitée. Nonobstant ces obstacles, il demeure primordial que les politiciens et les gestionnaires agissent rapidement à l'égard de la santé publique et des changements climatiques, notamment en adoptant des mesures de type « sans regret ». L'absence d'une littérature scientifique sans équivoque ne saurait être un prétexte à l'inaction.

REMERCIEMENTS

Je remercie ma directrice, Elisabeth Levac, pour son soutien et ses judicieux conseils. Son expertise a grandement contribué à la qualité de cet essai.

Je souligne la générosité des professionnels qui m'ont accordé de leur temps pour répondre à mes questions. Mélissa Généreux et Élisabeth Morin, de la Santé publique de l'Estrie, ainsi que Benoît Lalonde, de l'équipe de chercheurs de l'Atlas de la vulnérabilité, ont enrichi ma réflexion grâce à leurs précieux commentaires.

Je suis reconnaissant envers tout le personnel et les enseignants du CUFÉ. Leur travail remarquable au quotidien a agrémenté mes deux années de maîtrise dont je conserve d'excellents souvenirs.

Finalement, un gros merci à ma famille et mes ami(e)s qui ont contribué de près ou de loin à mon parcours universitaire. Je n'aurais jamais été en mesure d'atteindre tous mes objectifs sans leur appui inconditionnel et leur compréhension infinie pour mes absences répétées.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. CHAMP LEXICAL DU CONCEPT DE LA VULNÉRABILITÉ	3
1.1 Aléa	3
1.2 Exposition.....	3
1.3 Probabilité d'occurrence.....	3
1.4 Sensibilité	4
1.5 Capacité d'adaptation, capacité à faire face et résilience	4
1.6 Vulnérabilité.....	4
1.7 Risque.....	5
2. INTÉGRATION DE LA VULNÉRABILITÉ DANS LES PLANS D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	6
2.1 Guides de rédaction de plans d'adaptation aux changements climatiques	6
2.1.1 Guides d'Ouranos	6
2.1.2 Guides du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.....	7
2.1.3 Guide du gouvernement canadien	8
2.2 Exemples de plans d'adaptation aux changements climatiques de municipalités québécoises.....	8
2.2.1 Ville de Sherbrooke	9
2.2.2 Ville de Trois-Rivières et Ville de Laval.....	10
2.2.3 Ville de Montréal.....	10
2.3 Exemples de plans d'adaptation aux changements climatiques de différentes régions du Canada.....	11
2.3.1 Ville de Vancouver	11
2.3.2 Ville de Barrie et Ville d'Edmonton	12
2.4 Synthèse des plans d'adaptation aux changements climatiques produits au Canada	12

3.	APPLICATION DU PRINCIPE DE LA VULNÉRABILITÉ AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES POUR LA SANTÉ PUBLIQUE.....	13
3.1	Organisation mondiale de la Santé	13
3.2	Centers for Disease Control and Prevention.....	14
3.3	Simcoe Muskoka District Health Unit	14
3.4	Cas spécifique de la Ville de Montréal	15
3.5	Atlas de la vulnérabilité.....	15
4.	CADRE DU CALCUL DE LA VULNÉRABILITÉ POUR LE PRÉSENT ESSAI	17
4.1	Limites	17
4.2	Équation	18
4.3	Méthodes statistiques.....	18
4.4	Regroupement des données	21
4.5	Aléas	22
5.	INDICATEURS DE SENSIBILITÉ ET DE CAPACITÉ D’ADAPTATION POUR LES VAGUES DE CHALEUR.....	23
5.1	Définition d’une vague de chaleur	23
5.2	Impacts sur la santé	23
5.3	Indicateurs de sensibilité pour la population.....	24
5.4	Indicateurs de capacité d’adaptation	29
5.5	Mesures de suivi	34
6.	RÉSULTATS DU CALCUL DE LA VULNÉRABILITÉ À L’ÉCHELLE PROVINCIALE.....	35
6.1	Analyses et traitements des indicateurs choisis pour la sensibilité.....	35
6.1.1	Choix du nombre de composantes principales retenues.....	36
6.1.2	Pondération et équation de la sensibilité	42
6.1.3	Calcul du score Z et regroupement des données.....	43
6.2	Présentation des couches générées dans QGIS	48

6.3	Comparaison entre différentes méthodes de calcul de la sensibilité et l’Atlas de la vulnérabilité	48
6.4	Comparaison avec l’Atlas de la vulnérabilité pour le calcul de la capacité d’adaptation et de la vulnérabilité.....	57
7.	RECOMMANDATIONS POUR L’INTÉGRATION D’UN CALCUL DE VULNÉRABILITÉ À UN PLAN D’ADAPTATION SOUS L’ANGLE DE LA SANTÉ PUBLIQUE	64
7.1	Recommandations pour les organisations qui désirent utiliser un calcul déjà établi	64
7.2	Recommandations pour les organisations qui désirent produire leur propre calcul	67
7.3	Recommandations pour les chercheurs afin d’approfondir les connaissances.....	68
	CONCLUSION.....	70
	RÉFÉRENCES.....	72
	ANNEXE 1 – FORMULES MATHÉMATIQUES.....	80
	ANNEXE 2 – CAPTURES D’ÉCRAN DES COUCHES GÉNÉRÉES AVEC QGIS.....	82

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 4.1	Exemple fictif pour illustrer graphiquement une analyse en composante principale	19
Figure 4.2	Représentation graphique des vecteurs propres et de leurs valeurs propres pour une analyse en composante principale	20
Figure 6.1	Test du <i>goodness of variance fit</i> pour l'équation pondérée de sensibilité	45
Figure 6.2	Histogramme de la distribution des scores et comparaison entre le <i>Jenks Natural Breaks</i> et la méthode des quintiles pour l'équation pondérée de sensibilité	46
Figure 6.3	Histogramme de la distribution des scores et comparaison entre le <i>Jenks Natural Breaks</i> et la méthode des quintiles pour l'équation brute de sensibilité	47
Figure 6.4	Cartographie de la sensibilité pour la Ville d'Asbestos selon cinq méthodes différentes	52
Figure 6.5	Cartographie de la sensibilité pour la Ville de Magog selon cinq méthodes différentes	53
Figure 6.6	Cartographie de la sensibilité pour la Ville de Sherbrooke selon cinq méthodes différentes	54
Figure 6.7	Cartographie de la sensibilité pour l'île de Montréal selon cinq méthodes différentes ..	55
Tableau 4.1	Valeurs des vecteurs propres et variance des points de l'exemple fictif d'une analyse en composante principale	20
Tableau 4.2	Comparaison entre le regroupement des données par la méthode des terciles et par la méthode du <i>Jenks Natural Breaks</i>	21
Tableau 5.1	Indicateurs de sensibilité pour les vagues de chaleur recensés dans la littérature	26
Tableau 5.2	Indicateurs de sensibilité pour les vagues de chaleur retenus pour l'essai	27
Tableau 5.3	Stratégies d'adaptation contre les vagues de chaleur recensées dans la littérature	31
Tableau 6.1	Indicateurs retenus et poids démographique associé pour la province du Québec	36
Tableau 6.2	Résultats des valeurs propres et du pourcentage de la variance pour chaque composante	37
Tableau 6.3	Résultats de l'ACP avec rotation varimax pour 3 composantes principales et 14 indicateurs	38
Tableau 6.4	Résultats de l'ACP avec rotation varimax pour 5 composantes principales et 14 indicateurs	39

Tableau 6.5	Résultats de l'ACP avec rotation varimax pour 4 composantes principales et 14 indicateurs.....	40
Tableau 6.6	Résultats de l'ACP avec rotation varimax pour 4 composantes principales et 12 indicateurs.....	41
Tableau 6.7	Poids démographique des indicateurs à l'intérieur de chaque composante	42
Tableau 6.8	Coefficient de correction pour le calcul de la sensibilité	43
Tableau 6.9	Équations de la sensibilité explorées dans le cadre de l'essai	43
Tableau 6.10	Comparaison entre le <i>Jenks Natural Breaks</i> et la méthode des quintiles sous forme numérique pour l'équation pondérée de sensibilité	46
Tableau 6.11	Comparaison entre le <i>Jenks Natural Breaks</i> et la méthode des quintiles sous forme numérique pour l'équation brute de sensibilité	47
Tableau 6.12	Population et nombre de ménages pour la province de Québec, l'île de Montréal, la Ville de Sherbrooke, la Ville de Magog et la Ville d'Asbestos	49
Tableau 6.13	Scores Z moyen des aires de diffusion de la province de Québec, l'île de Montréal, la Ville de Sherbrooke, la Ville de Magog et la Ville d'Asbestos	49
Tableau 6.14	Poids démographique des 4 composantes de la sensibilité pour la province de Québec, l'île de Montréal, la Ville de Sherbrooke, la Ville de Magog et la Ville d'Asbestos.....	50
Tableau 6.15	Indicateurs et composantes de la sensibilité utilisés par les chercheurs de l'Atlas de la vulnérabilité	51
Tableau 6.16	Distribution des niveaux de sensibilité par aires de diffusion selon la méthode de calcul.....	56
Tableau 6.17	Indicateurs retenus par l'équipe de chercheurs de l'Atlas de la vulnérabilité pour la capacité à faire face	58
Tableau 6.18	Équation retenue pour la capacité d'adaptation	59
Tableau 6.19	Score Z de chaque composante et poids démographique de chaque indicateur pour la Ville de Magog.....	60
Tableau 7.1	Comparaison de trois méthodes différentes pour intégrer un calcul de vulnérabilité dans un plan d'adaptation	64

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

ACP	Analyse en composante principale
CDC	<i>Centers for Disease Control and Prevention</i>
CERFO	Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy
CSV	<i>Comma-separated values</i>
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GVF	<i>Goodness of variance fit</i>
HFC	Hydrofluorocarbure
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISÉ	Information, sensibilisation et éducation
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux
OMS	Organisation mondiale de la Santé
ONG	Organisations non gouvernementales
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
RSSS	Réseau de la santé et des services sociaux

SUPREME	Système de surveillance et de prévention des impacts sanitaires des événements météorologiques extrêmes
SIG	Systèmes d'information géographique

INTRODUCTION

Les conséquences des changements climatiques affligent déjà de nombreuses communautés, surtout celles dont les situations économiques, géographiques et sociales sont précaires. Selon les prédictions des scientifiques, les répercussions négatives s'accroîtront avec le temps. (IPCC, 2014) Les différents paliers de gouvernement doivent donc prévoir des mesures d'adaptation afin d'atténuer les impacts anticipés. Les municipalités se retrouvent en première ligne, mais ne possèdent souvent pas les ressources pour rédiger des plans d'adaptation complets. (Ouranos, 2010; Ouranos, 2015) Les enjeux liés à la santé et à la sensibilité des populations ne sont pas intégrés systématiquement aux analyses, ce qui complexifie la tâche de prioriser les actions. (Richardson, 2010) Ces lacunes s'expliquent par le manque de lignes directrices et de données probantes à ce sujet, ce qui justifie d'approfondir la recherche dans ce domaine. (Mayrhuber et al., 2018)

L'objectif général de cet essai consiste à développer un calcul standardisé de la vulnérabilité aux vagues de chaleur sous l'angle de la santé publique. Bien que de nombreux aléas climatiques accablent la population mondiale, seules les vagues de chaleur ont été analysées. Il serait redondant de tous les examiner, puisque les principes de base et les équations demeurent identiques. L'unique différence réside dans le choix des indicateurs qui doivent être adaptés à l'aléa retenu.

Afin d'y parvenir, trois objectifs spécifiques sont établis pour cerner les divers aspects de la problématique. Une revue de la littérature est effectuée pour relever le contenu des plans d'adaptation aux changements climatiques et les particularités liées au domaine de la santé publique. Ces informations forment le point de départ pour concevoir l'équation. Ensuite, les indicateurs appropriés pour déterminer la vulnérabilité sont analysés à la lueur des données probantes actuelles, ce qui permet d'employer les bonnes variables à l'intérieur de l'équation retenue. Enfin, le lien entre le calcul de la vulnérabilité et les plans d'adaptation est souligné, car un résultat chiffré sans actions subséquentes confère peu de bénéfices.

Toute la littérature scientifique recensée dans le présent essai a été revue par les pairs. Google Scholar, PubMed et SCOPUS ont été utilisés pour trouver les études les plus récentes et les plus pertinentes pour le sujet traité. Google a servi à dénicher la littérature grise. Les sites Internet du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), de l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), de la santé publique de l'Estrie, d'Environnement Canada, d'Ouranos, de Santé Canada, de Ressources naturelles Canada, de l'*Environmental Protection Agency* (EPA), du *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC) et de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) ont été étudiés.

Ces organisations appuient toujours leurs recommandations sur une littérature scientifique solide, ce qui en fait des sources crédibles. De plus, cela révèle l'état de l'avancement des politiques publiques qui concernent ces enjeux.

Sept chapitres composent cet essai. Le chapitre 1 établit les définitions et les concepts essentiels à la compréhension du phénomène de la vulnérabilité, comme ceux de la sensibilité, de la capacité d'adaptation et de la capacité à faire face. Le chapitre 2 explique l'intégration de la vulnérabilité dans les plans d'adaptation municipaux. Une revue des guides de rédaction d'organisations reconnues comme Ouranos et le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) précède l'analyse des plans d'adaptation de grandes villes comme Montréal, Sherbrooke, Laval, Vancouver et Edmonton. Le chapitre 3 se concentre sur les enjeux propres aux instances de santé publique et s'appuie sur les recommandations de l'OMS et du CDC. Une introduction aux initiatives comme l'Atlas de la vulnérabilité illustre l'application de ces recommandations. Le chapitre 4 jette les bases des concepts mathématiques utilisés comme l'analyse en composante principale et les techniques de regroupement des données. Le chapitre 5 examine les indicateurs de sensibilité et de capacité d'adaptation qui sont reliés aux vagues de chaleur. Une revue de la littérature souligne les incertitudes qui entourent ces notions et situe l'avancement des connaissances dans le domaine. Le chapitre 6 calcule la vulnérabilité et explore différentes équations pour bien comprendre les enjeux derrière les paramètres choisis. La méthodologie de l'Atlas de la vulnérabilité est décrite, puis elle est comparée avec quatre approches différentes qui intègrent diverses pondérations et techniques de regroupement des données. Enfin, le chapitre 7 émet des recommandations aux organisations et aux chercheurs à la lueur des conclusions tirées dans les chapitres précédents.

1. CHAMP LEXICAL DU CONCEPT DE LA VULNÉRABILITÉ

Plusieurs notions clés entourent le concept de la vulnérabilité comme l'aléa, l'exposition, la probabilité d'occurrence, la sensibilité, la capacité d'adaptation, la capacité à faire face, la résilience et le risque. La définition de ces termes tend à évoluer dans le temps et à varier selon les auteurs. Afin d'éviter toute confusion, ce chapitre fournit une explication détaillée de ces concepts qui serviront tout au long de cet essai. (Brooks, 2003; Cardona et al., 2012; Oppenheimer et al., 2014; Barrette et al., 2018a; Connelly, Carter, Handley et Hincks, 2018; Sharma et Ravindranath, 2019)

1.1 Aléa

Selon la définition du GIEC, un aléa (*hazard*) est un phénomène naturel ou anthropique qui peut perturber les communautés humaines ou les écosystèmes. Les principaux aléas climatiques identifiés sont la hausse du niveau des mers, les crues soudaines, la modification de la distribution des précipitations, les pluies abondantes, les sécheresses et les vagues de chaleur. (Oppenheimer et al., 2014) La combinaison de ces éléments conduit parfois à des événements extrêmes. Par exemple, un mélange de sécheresses, de vagues de chaleur et de faibles précipitations réunit les conditions propices au déclenchement de feux de forêt. Toutefois, certains aléas ne sont pas liés au climat, comme les tremblements de terre et les éruptions volcaniques. (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2012) Ainsi, ce mot peut se retrouver dans plusieurs contextes, comme celui de la sécurité publique, mais il sous-tend généralement le même concept. Il peut être caractérisé de plusieurs façons, comme par sa probabilité d'occurrence, son intensité, sa durée, son potentiel destructeur, etc. (Brooks, 2003; ministère de la Sécurité publique, 2008a; Barrette et al., 2018a)

1.2 Exposition

L'exposition se définit comme la présence de communautés humaines ou d'écosystèmes dans une zone affectée par un aléa potentiel. Ainsi, l'exposition à la hausse du niveau des mers ne sera pas la même pour les villes côtières que pour celles situées à l'intérieur des terres. (Cardona et al., 2012; Oppenheimer et al., 2014; ; Connelly et al., 2018; Sharma et Ravindranath, 2019)

1.3 Probabilité d'occurrence

La probabilité d'occurrence détermine les chances que l'aléa étudié se produise sur un territoire donné. Elle peut se calculer sous forme qualitative ou quantitative. Par exemple, un événement extrême pourrait

être classé de presque certain (à tous les ans) à rare (1 fois tous les 500 ans). L'échelle peut varier selon les auteurs. (Ministère de la Sécurité publique, 2008b; Oppenheimer et al., 2014; Connelly et al., 2018) La loi normale permet aussi d'analyser des paramètres comme les températures quotidiennes afin d'observer leur fréquence et leur probabilité. Ainsi, un déplacement de la courbe peut démontrer une récurrence accrue de journées plus chaudes annuellement. (IPCC, 2012)

1.4 Sensibilité

La sensibilité se définit comme l'ampleur de l'impact d'un aléa sur un système exposé. Par exemple, les automobilistes canadiens qui conduisent régulièrement dans des tempêtes de neige sont moins sensibles à cet aléa que leurs homologues européens peu habitués à affronter ce type de précipitation. (Ministère de la Sécurité publique, 2008a; Cardona et al., 2012; Oppenheimer et al., 2014; Connelly et al., 2018; Sharma et Ravindranath, 2019)

1.5 Capacité d'adaptation, capacité à faire face et résilience

La capacité d'adaptation et la capacité à faire face réfèrent à la notion d'atténuation des conséquences liées à un aléa. La capacité d'adaptation est le potentiel de réduction des impacts d'un événement futur, alors que la capacité à faire face est une mesure immédiate. Par exemple, les camions de déneigement associés à un système de communication bien implanté au Canada permettent de faire face aux tempêtes de neige actuelles. L'ajout d'équipements supplémentaires augmenterait la capacité d'adaptation pour les précipitations plus intenses anticipées avec les changements climatiques. (Brooks, 2003; Barrette et al., 2018a) La résilience renvoie à la capacité d'une communauté à maintenir un niveau de fonctionnement acceptable malgré un aléa. Ce terme est analogue à la capacité à faire face. (Ministère de la Sécurité publique, 2008a; Cardona et al., 2012; Connelly et al., 2018; Sharma et Ravindranath, 2019)

1.6 Vulnérabilité

La vulnérabilité peut être présentée sous l'angle biophysique ou social. La définition biophysique se calcule selon l'aléa, l'exposition et la sensibilité, ce qui donne une estimation de l'état du système après un événement perturbateur. La vulnérabilité sociale est déterminée par la sensibilité de la communauté et permet d'établir un portrait de l'état du système avant l'événement perturbateur. Les deux formulations sont liées, puisqu'une faible vulnérabilité sociale devrait en théorie limiter les conséquences retrouvées dans le modèle biophysique d'un système. Ces concepts se décrivent sous forme mathématique.

L'équation $V_p^t = V_o - \alpha_0 t$ décrit la vulnérabilité potentielle au temps $t = 0$ où (V_o) représente la vulnérabilité actuelle et $(\alpha_0 t)$ la capacité à faire face. Cette équation peut se modifier pour calculer la capacité d'adaptation à travers le temps grâce à une intégrale, ce qui donne $V^t = V_o - \int \alpha dt$. (Brooks, 2003)

La définition du GIEC a évolué entre le quatrième et le cinquième rapport. Auparavant, la vulnérabilité se déterminait selon l'exposition à un aléa (E) multipliée par la sensibilité de la communauté (S) moins la capacité d'adaptation (CA), ce qui se traduit par l'équation $V = (E \times S) - CA$. La dernière définition ne prend en compte que la sensibilité et la capacité d'adaptation, ce qui donne l'équation simplifiée $V = S - CA$. Cette approche permet de calculer la vulnérabilité inhérente d'une communauté avant l'exposition à un aléa, plutôt que de regarder l'état après les faits. Cela facilite le choix des solutions pour les décideurs, surtout dans un contexte où la gravité des impacts et la rapidité des changements climatiques demeurent incertaines. (Connelly et al., 2018; Sharma et Ravindranath, 2019)

Certaines organisations comme le *Centers for Disease Control and Prevention (CDC)* et le gouvernement canadien utilisent encore la définition du quatrième rapport dans leurs documents officiels. (Warren et Lemmen, 2014; Center for Disease Control and Prevention [CDC], 2015)

1.7 Risque

Le risque (R) se calcule par la probabilité d'occurrence d'un aléa (P) multipliée par les conséquences potentielles (C) ce qui donne la formule $R = P \times C$. Cette approche s'appuie sur la vulnérabilité biophysique qui détermine les conséquences après un aléa. (Brooks, 2003; Ministère de la Sécurité Publique, 2008a; Ouranos, 2010; Oppenheimer et al., 2014; Urban Land Institute [ULA], 2015) Afin de tenir compte de la nouvelle définition de la vulnérabilité, il est possible d'écrire l'équation sous la forme $R = P \times V$, où $V = (S - CA)$. (Connelly et al., 2018; Sharma et Ravindranath, 2019)

2. INTÉGRATION DE LA VULNÉRABILITÉ DANS LES PLANS D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les calculs de risques et de vulnérabilités n'ont de sens que s'ils sont intégrés dans des outils de planification afin d'aider à la prise de décisions. Ce chapitre comprend une revue de la littérature sur la rédaction de plans d'adaptation aux changements climatiques qui sert de point de départ à la réflexion.

2.1 Guides de rédaction de plans d'adaptation aux changements climatiques

La rédaction de plans d'adaptation aux changements climatiques nécessite beaucoup de ressources et d'expertises qui ne sont pas à la portée de tous. Pour cette raison, des organismes comme Ouranos, le GIEC et le gouvernement canadien ont produit des guides à l'intention des acteurs de premières lignes. Ceux-ci sont présentés en ordre chronologique et comportent des recommandations générales à adapter aux réalités locales.

2.1.1 Guides d'Ouranos

Ouranos a publié le guide *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques* en 2010. Ce dernier, destiné au milieu municipal québécois, a servi de base pour la plupart des plans produits dans la province. Bien que ce guide date un peu, il demeure d'actualité pour la très grande majorité de ses recommandations et peut être complété avec le document rédigé en 2015 intitulé *Vers l'adaptation : Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*.

Parmi les éléments clés à retenir, six étapes ressortent.

1. Quelques préalables sont requis pour assurer le succès de cette démarche. L'obtention d'un mandat clair de la classe politique est nécessaire afin d'éviter que ce plan ne soit mis de côté et que ces efforts ne soient vains. Un coordonnateur et des personnes-ressources doivent être nommés et les rôles bien définis pour garantir un suivi adéquat. Ces derniers doivent s'entendre sur un échéancier et les livrables à produire pour conserver une vision d'ensemble du projet.
2. Par la suite, l'analyse des aléas actuels qui affligent le territoire à l'étude fixe un point de départ qui sert de référence pour les évaluations futures. Puisque la réalité d'une ville nordique ne se compare pas à celle d'une métropole au sud, cela teinte la teneur du plan.
3. La détermination de la situation de base permet d'anticiper les impacts des changements climatiques et d'effectuer un calcul de vulnérabilité. La synthèse de 2015 d'Ouranos redéfinit celle-

ci selon l'équation $V = S - CA$ afin de tenir compte des plus récentes avancées dans le domaine.

4. L'appréciation du risque s'appuie sur la formule $R = P \times C$ et produit une valeur numérique associée aux aléas retenus.
5. L'établissement du niveau de risque simplifie la hiérarchisation des priorités et l'application des solutions possibles pour atténuer ce dernier.
6. L'ensemble du processus facilite l'élaboration d'un plan d'adaptation qui repose sur des données solides. (Ouranos, 2010; Ouranos, 2015)

Cette démarche ne représente que le premier pas vers l'adaptation. Un suivi rigoureux doit être assuré pour évaluer l'efficacité des mesures mises de l'avant. Les étapes trois à six doivent être répétées au même rythme que l'évolution de la littérature scientifique sur le sujet. L'intégration des acteurs de la société civile est essentielle, car sans l'acceptabilité sociale des solutions retenues, aucun progrès à la lutte aux changements climatiques ne sera effectué. (Ouranos, 2010; Ouranos, 2015)

2.1.2 Guides du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Le GIEC a produit un rapport spécial intitulé *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* qui complète bien le chapitre 19 *Emergent Risks and Key Vulnerabilities* du deuxième groupe de travail du cinquième rapport. Ces publications constituent la base sur laquelle s'appuie la littérature scientifique des dernières années.

Il serait fastidieux et peu pertinent dans le contexte de cet essai de rédiger un résumé exhaustif de ces deux documents. Cependant, quelques concepts intéressants méritent de s'y attarder afin de pousser la réflexion sur les plans d'adaptation plus loin.

Les boucles d'apprentissage conscientisent les décideurs sur la portée de leur analyse. Par exemple, pour la gestion des inondations, une simple boucle considère l'action à poser pour résoudre le problème, comme l'élévation d'une digue. Une double boucle intègre un cadre à l'analyse et permet d'étudier si d'autres impacts des changements climatiques devraient être examinés dans la stratégie. Enfin, la triple boucle inclut le contexte et remet en question l'allocation des ressources et le fonctionnement des sociétés. Ainsi, si la prévention des inondations dans un secteur donné est trop onéreuse, il est pertinent de se demander si le déplacement des populations serait préférable aux investissements colossaux requis pour maintenir les infrastructures actuelles en place. En pratique, la boucle simple est celle sur laquelle les

décideurs s'appuient pour affronter les crises, car elle constitue la solution la plus facile dans l'immédiat. Cependant, un risque de maladaptation existe et cette approche peut nuire à long terme. (IPCC, 2012; Oppenheimer et al., 2014)

La notion d'adaptation « sans regret » est également très importante. Celle-ci stipule que la stratégie d'adaptation choisie doit s'appliquer à un large éventail de scénarios. Par exemple, la protection d'une tourbière pour réguler les inondations reste une excellente décision même si ces dernières sont moins graves qu'anticipées, car les services écosystémiques offerts par le milieu naturel demeurent essentiels même en l'absence d'aléas causés par les changements climatiques. (IPCC, 2012; Oppenheimer et al., 2014)

De plus, la synergie entre l'adaptation et l'atténuation y est soulignée. Par exemple, la végétalisation des milieux urbains séquestre du carbone, améliore la qualité de l'air, diminue l'intensité des vagues de chaleur et réduit les risques d'inondation. Dans un contexte de ressources limitées, la considération de solutions qui permettent d'atteindre de multiples objectifs à la fois s'avère primordiale. (Oppenheimer et al., 2014)

2.1.3 Guide du gouvernement canadien

Le gouvernement canadien a publié en 2010 un guide intitulé *S'adapter aux changements climatiques : Une introduction à l'intention des municipalités canadiennes*. La Nouvelle-Écosse s'est inspirée de ce travail et a produit le sien pour l'adapter aux provinces atlantiques. (Richardson, 2010; Service Nova Scotia and Municipal relations, 2011)

Les informations de base qui se retrouvent dans ces deux guides recoupent celles présentes dans les documents d'Ouranos. Cependant, ces documents demeurent pertinents, car ils présentent des exemples pancanadiens d'adaptation aux changements climatiques, comme celui de la Ville de Toronto qui a mis en place un système d'alerte pour lutter contre les vagues de chaleur. Un outil de cartographie combiné à un plan d'intervention permet à la Ville de coordonner ses actions pour augmenter son efficacité. (Richardson, 2010; Service Nova Scotia and Municipal relations, 2011)

2.2 Exemples de plans d'adaptation aux changements climatiques de municipalités québécoises

Quelques villes québécoises ont profité des subventions du programme Climat municipalités pour élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. La méthodologie employée diffère d'une municipalité

à l'autre, car aucune standardisation n'existe pour rédiger ces plans. De plus, puisque les ressources sont limitées et que la collecte de données est complexe, il est normal que ceux-ci ne soient pas aussi exhaustifs que ce que la littérature scientifique suggère de faire. Néanmoins, cela demeure un bon point de départ pour bâtir sur ce qui a déjà été accompli. (Ville de Sherbrooke, 2013; Ville de Trois-Rivières, 2013; Ville de Montréal, 2015; Ville de Laval, 2016; Ville de Montréal, 2017)

2.2.1 Ville de Sherbrooke

La Ville de Sherbrooke a établi les aléas liés aux changements climatiques qui pouvaient affecter leur territoire. Ensuite, elle a opté pour une approche d'évaluation du risque (R) qui s'appuie sur la formule $R = P \times G - C$ similaire à celle du quatrième rapport du GIEC. La probabilité d'occurrence (P) se détermine sur une échelle qui va de 0 (non applicable) à 7 (événement annuel). La gravité (G) utilise une graduation qui s'étend de 0 (négligeable) à 7 (impacts irréversibles et coûteux). La capacité de réaction (C) se détaille de 0 (aucune) à 7 (structurée et optimisée). Les trois variables ont été quantifiées selon la perception des différents départements de la Ville de Sherbrooke, puis une moyenne a été calculée avec toutes les opinions recueillies. (Ville de Sherbrooke, 2013)

Cette technique subjective a le désavantage de produire un éventail de réponses qui possède parfois un écart-type élevé. Par exemple, la réduction de la capacité de traitement des eaux usées a obtenu une cote de 7 par la division de la gestion des eaux, alors que la division des infrastructures attribuait une valeur de 33. Une note finale de 19 a été décernée à cet enjeu à la suite de la compilation des impressions de toutes les divisions. (Ville de Sherbrooke, 2013)

Les scores de tous les aléas ont été classifiés selon trois seuils de risque, allant de faible (≤ 19 points) à élevé (≥ 30 points). Cette hiérarchisation permet à la Ville de prioriser ses actions et donne un aperçu du portrait de la situation. (Ville de Sherbrooke, 2013)

Pour ce qui est de la composante santé publique du plan, celle-ci a été considérée indirectement. Parmi les conséquences environnementales appréhendées, le risque accru de maladies (dermatite, gastro-entérites, etc.) relié à la fréquentation des plages et la croissance de moisissures attribuable aux inondations ont été évalués. (Ville de Sherbrooke, 2013)

2.2.2 Ville de Trois-Rivières et Ville de Laval

Les deux municipalités ont mandaté la même firme de consultants pour produire leur plan d'adaptation aux changements climatiques, ce qui entraîne de nombreuses similarités. À la différence de la Ville de Sherbrooke, la capacité de réaction n'a pas été retenue. La formule adoptée a donc été $R = P \times G$. La Ville de Trois-Rivières a coté les variables de 0 à 7, alors que, pour la Ville de Laval, l'échelle a été réduite de 0 à 5. Ces notes étaient attribuées par des experts et des ressources internes de chaque ville respective. (Ville de Trois-Rivières, 2013; Ville de Laval, 2016)

Des analyses ont été effectuées pour la Ville de Trois-Rivières pour la morbidité, la mortalité et le stress mental associés à chaque aléa. Malgré la subjectivité du calcul, cela facilite l'intégration d'actions concrètes en la matière dans leur plan d'adaptation, comme la mise en place d'un protocole d'alerte pour les infrastructures médicales de la région. (Ville de Trois-Rivières, 2013)

La démarche a été bonifiée pour la Ville de Laval avec l'ajout de la notion de populations vulnérables dans la composante santé publique, ce qui a permis de les inclure dans les recommandations. (Ville de Laval, 2016)

2.2.3 Ville de Montréal

La Ville de Montréal a produit deux documents qui portent sur l'adaptation aux changements climatiques. Le premier, paru en 2015, traite des mesures d'adaptation et le second, publié en 2017, souligne les constats. (Ville de Montréal, 2015; Ville de Montréal, 2017)

L'approche de la Ville est intéressante et se démarque de ce qui s'est fait dans le reste de la province. Dans un premier temps, la formule classique $R = P \times G$ n'a pas été considérée. Puisque la probabilité d'occurrence est difficile à calculer avec exactitude et que les aléas frappent déjà la Ville de Montréal (inondations, vagues de chaleur, etc.), cette variable a été ignorée. De plus, comme la capacité d'adaptation est ardue à déterminer, celle-ci a été mise de côté pour se concentrer seulement sur la sensibilité. Le territoire a été découpé par aire de diffusion telle que définie par Statistique Canada. Celle-ci est la plus petite échelle géographique pour laquelle on possède des données précises pour le recensement et regroupe entre 400 et 700 personnes. (Statistique Canada, 2018a)

La méthodologie est complexe et se base sur l'équation :

$$S_{soc.AD} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J II_i \times SG_{ij}$$

où II_i est l'importance de l'impact i de 0 à 3 et SG_{ij} est la sensibilité du groupe de personnes j à l'impact i de 0 à 3 selon des experts. Les groupes de personnes vulnérables retenus sont les femmes, les enfants de 0 à 15 ans, les nourrissons et les tout-petits de 0 à 6 ans, les personnes de 65 ans et plus, les personnes vivant seules, celles matériellement défavorisées et les immigrants récents ne parlant aucune langue officielle. Une aire de diffusion devait contenir les deux premiers quintiles du groupe vulnérable pour être considérée dans l'équation. Les aléas choisis ont été l'augmentation des températures moyennes, les pluies abondantes, les vagues de chaleur, les tempêtes destructrices, les sécheresses et les crues. (Ville de Montréal, 2017)

Par la suite, les résultats ont été catégorisés selon cinq niveaux qui se classent d'une vulnérabilité non significative à majeure. Les seuils des cinq plages ont été établis en fonction de la valeur minimale et de la valeur maximale des scores obtenus, puis ils ont été divisés par intervalles en parts égales. (Ville de Montréal, 2017)

La santé occupe un pan important de l'analyse et comprend neuf conséquences appréhendées, comme les traumatismes psychologiques, l'augmentation de la prévalence des zoonoses et la hausse des problèmes liés aux coups de chaleur. (Ville de Montréal, 2017)

2.3 Exemples de plans d'adaptation aux changements climatiques de différentes régions du Canada

Le contexte politique et réglementaire qui prévaut dans les autres provinces canadiennes est différent de celui du Québec. Cependant, les démarches entreprises par ces dernières demeurent intéressantes et s'appuient sur une littérature scientifique crédible. Les plans d'adaptation les plus pertinents sont examinés afin d'obtenir un portrait d'ensemble de ce qui se fait à l'échelle nationale.

2.3.1 Ville de Vancouver

La Ville de Vancouver, en Colombie-Britannique, a utilisé une matrice de risques standard qui s'appuie sur l'équation $R = P \times G$. La vulnérabilité a été calculée selon la formule $V = S \times CA$. La capacité d'adaptation se basait sur les coûts et les ressources humaines nécessaires pour s'adapter et se traduisait

de manière qualitative. Par exemple, une haute sensibilité multipliée par une faible capacité d'adaptation donnait une grande vulnérabilité. Par la suite, les résultats du risque et de la vulnérabilité pour un aléa étaient combinés pour établir les actions prioritaires. (City of Vancouver, 2012)

D'un point de vue de la santé publique, les conséquences des vagues de chaleur, des zoonoses, des maladies respiratoires et des moisissures après les inondations étaient prises en compte dans le plan d'adaptation. (City of Vancouver, 2012)

2.3.2 Ville de Barrie et Ville d'Edmonton

L'approche de la Ville de Barrie, en Ontario, ressemble beaucoup à celle de Vancouver. Une matrice a été bâtie pour analyser la vulnérabilité et s'appuie sur l'équation $V = S \times CA$ où chaque variable était classée de 1 à 5 selon l'avis des départements de la Ville. Par la suite, pour les aléas où la vulnérabilité était considérée comme significative, l'exercice a été complété avec une matrice de risques suivant la formule $R = P \times G$ où chaque élément était aussi noté de 1 à 5 en fonction de la perception des intervenants. Le maintien de la santé publique s'avérait un objectif prioritaire et constituait une partie intégrante du plan d'adaptation. Cependant, les moyens pour y parvenir demeuraient flous. (City of Barrie, 2017)

Pour ce qui est de la Ville d'Edmonton, en Alberta, elle ne définit pas l'échelle utilisée, mais le document décrit une méthodologie fort similaire à celle de la Ville de Barrie. La santé publique est évoquée, mais la mise en œuvre des actions pour la préserver n'est pas explicitée. (City of Edmonton, 2018)

2.4 Synthèse des plans d'adaptation aux changements climatiques produits au Canada

Les nombreux exemples soulignés dans les sous-sections précédentes permettent de dégager des tendances. Les matrices de risque qui reposent sur des éléments qualitatifs sont les plus utilisées. Cette démarche brosse un portrait de la situation, mais manque de précision, car elle s'appuie sur la perception des intervenants plutôt que sur des mesures tangibles. L'absence de standardisation empêche de comparer les résultats entre les différentes régions.

De plus, les notions de santé publique sont peu abordées lors de ces exercices. Puisque les enjeux liés aux changements climatiques sont extrêmement variés, il est normal que toutes les questions ne puissent pas être approfondies dans un seul document. Pour cette raison, il est pertinent d'effectuer une analyse sous l'angle de la santé publique uniquement pour bien capturer cette dimension et orienter les décideurs sur cette question.

3. APPLICATION DU PRINCIPE DE LA VULNÉRABILITÉ AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES POUR LA SANTÉ PUBLIQUE

Ce chapitre discute des lignes directrices suggérées par des organisations spécialisées en santé publique comme l'OMS et le CDC. Un exemple ontarien pertinent est analysé, puis le travail de chercheurs québécois est revu pour faire un tour d'horizon de l'application de ces concepts en tenant compte de la réalité provinciale. (Thomas et al., 2012; CDC, 2015; OMS, 2015; Ebi, Anderson, Berry et Yusa, 2016; CDC, 2017; Levison, Whelan et Butler, 2017; Barrette et al., 2018a; Levison et al., 2018)

3.1 Organisation mondiale de la Santé

L'OMS ne propose pas une équation précise pour le calcul de la vulnérabilité, mais fournit un cadre flexible afin de l'adapter à la réalité locale. En effet, les recommandations de cette organisation visent autant les pays en voie de développement que ceux développés. La structure de l'évaluation se décline en trois étapes et ressemble beaucoup à celle suggérée par Ouranos pour rédiger un plan d'adaptation aux changements climatiques. (OMS, 2015)

1) La première consiste à bien déterminer les limites et la portée de l'analyse afin de construire des fondations solides à la démarche. La zone géographique associée aux problématiques sanitaires étudiées, la définition des termes employés et le contexte politique doivent être considérés. De plus, il faut identifier les personnes responsables de chaque action, organiser les partenariats nécessaires et mettre en place un mécanisme de communication efficace. (OMS, 2015)

2) La deuxième se concentre sur l'évaluation de la vulnérabilité, les effets anticipés et les stratégies d'adaptation à adopter. Le fardeau de la morbidité actuelle et les programmes de santé publique existants doivent être répertoriés afin d'établir un point de départ. L'analyse de la progression de ces deux composantes doit être effectuée avec et sans le contexte des changements climatiques. Enfin, des mesures d'adaptation doivent être étudiées pour réduire la différence entre le scénario de référence et celui des changements climatiques. (OMS, 2015)

3) La troisième consiste en la planification et l'application des mesures d'adaptation retenues à l'étape précédente. Un suivi rigoureux doit être réalisé afin d'assurer l'atteinte des objectifs. De plus, l'évolution rapide de la littérature scientifique ajoute des informations qui peuvent nécessiter des corrections importantes au plan initial. Les étapes deux et trois sont donc itératives. Par conséquent, il demeure

primordial de prévoir des ressources à long terme, puisque ce n'est pas un projet qui peut se conclure au bout de quelques années. (OMS, 2015)

3.2 *Centers for Disease Control and Prevention*

Le CDC a conçu le cadre BRACE (*Building Resilience Against Climate Effect*) pour les départements de santé publique des États-Unis. Malgré la parution de ce guide en 2015, l'équation retenue pour la vulnérabilité a été celle du quatrième rapport du GIEC qui date de 2007. Les grandes lignes des recommandations rejoignent celles de l'OMS, mais certains éléments sont adaptés à la réalité nord-américaine. Par exemple, la combinaison des données du recensement américain et de l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) est au cœur de leur stratégie. (CDC, 2015)

Deux méthodes statistiques sont proposées, soit l'analyse en composante principale (ACP) ou la régression spatiale. La régression spatiale produit de meilleurs résultats, mais nécessite énormément de ressources et des données très précises pour être efficace. Par conséquent, l'ACP est généralement privilégiée, car elle permet tout de même une bonne estimation de la vulnérabilité sans requérir une collecte exhaustive de données. Ce concept est approfondi à la section 4.3. C'est la raison pour laquelle cette dernière méthode prévaut dans la majorité des études et des évaluations. Il est suggéré de classer la sensibilité et l'exposition en quartile, puis de déterminer les zones les plus sensibles selon le score établi. L'ajout d'une pondération peut être envisagé afin de tenir compte de l'importance des différents facteurs sur les conséquences sanitaires reliées à l'aléa analysé. (CDC, 2015)

3.3 *Simcoe Muskoka District Health Unit*

Le département de santé publique du district de Simcoe Muskoka, en Ontario, a rédigé un document technique applicable à leur réalité locale concernant la vulnérabilité aux changements climatiques, ainsi qu'un article scientifique. (Levison et al., 2017 ; Levison et al., 2018) Ce travail s'inspire de celui accompli par Ressources naturelles Canada qui a publié *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*. Le chapitre 7 se consacre à la santé humaine. (Warren et Lemmen, 2014) De plus, le gouvernement ontarien a produit une trousse à outils afin d'aider ses départements de santé, dont celui de Simcoe Muskoka. (Ebi et al., 2016)

Aucun calcul de vulnérabilité n'a été effectué. Leur analyse, bien que très exhaustive, demeure principalement qualitative. Cette approche est utile pour donner des lignes directrices générales aux décideurs, mais elle n'offre pas un portrait à une fine échelle de résolution. (Levison et al., 2017)

3.4 Cas spécifique de la Ville de Montréal

Des chercheurs québécois se sont penchés sur le cas de la vulnérabilité sociétale et territoriale de la Ville de Montréal aux inondations. Une ACP qui regroupe 11 indicateurs de sensibilité sociale tirés du recensement de 2006 de Statistique Canada a permis de dégager 4 composantes principales, soit les aînés et la faible scolarisation, la famille et la population jeune, la concentration et la croissance démographique ainsi que la pauvreté et l'immigration. La description et l'analyse de ces indicateurs sont effectuées dans le chapitre 5. Fait à noter, l'ajout d'une pondération pour chaque indicateur par des experts n'a pas modifié les résultats significativement. La notion d'infrastructures sensibles, comme les hôpitaux et les garderies, a été prise en compte grâce à la géomatique et a été intégrée dans un indice de sensibilité territoriale. (Thomas et al., 2012)

La capacité d'adaptation a été déterminée à l'aide de l'outil IAdapt qui est expliqué à la sous-section 6.1.6. La vulnérabilité totale a été calculée selon l'équation $V = (S_{sociale} + S_{territoriale}) - CA$. Le résultat final a permis d'obtenir une carte de vulnérabilité aux inondations à l'échelle des aires de diffusion. Plutôt que d'utiliser des quintiles, les chercheurs ont choisi d'opter pour une méthode de regroupement des données (*data clustering*) basée sur le *Jenks Natural Breaks*. Cette technique est décrite plus en détail dans le chapitre 4. (Thomas et al., 2012)

3.5 Atlas de la vulnérabilité

L'effort le plus ambitieux pour cartographier la vulnérabilité reliée aux vagues de chaleur et aux inondations à l'échelle du Québec a été réalisé par une équipe de chercheurs de l'Université Laval. Ces derniers ont également utilisé une ACP pour classer leurs 12 indicateurs de sensibilité à l'intérieur de 4 composantes. L'analyse s'est appuyée sur les aires de diffusion et les données du recensement de 2016 de Statistique Canada. Cependant, une modification de la géométrie des aires de diffusion a été effectuée afin de mieux délimiter les lieux habités. (Barrette et al., 2018a)

La capacité d'adaptation a été déterminée par la présence ou non d'infrastructures qui facilitent les interventions en cas de problèmes, comme les hôpitaux ou les casernes de pompier. L'équation de la vulnérabilité employée a été $V = S - CFF$ où CFF représente la capacité à faire face à un aléa. La sensibilité était divisée en quintiles, alors que la capacité à faire face a été fractionnée en terciles. Le croisement de ces informations a produit le résultat final qui est cartographié sur une carte qui recouvre

l'ensemble des zones habitées du Québec. Tous les détails de la démarche sont examinés au chapitre 6.
(Barrette et al., 2018a)

4. CADRE DU CALCUL DE LA VULNÉRABILITÉ POUR LE PRÉSENT ESSAI

Les chapitres précédents ont permis d'effectuer un tour d'horizon des principes de la vulnérabilité. Le chapitre 1 a établi les bases pour cerner les définitions. Le chapitre 2 a contextualisé ces termes dans des plans d'adaptation généraux, alors que le chapitre 3 s'est concentré sur son application dans le domaine de la santé. Le présent chapitre sert à préciser les limites, les définitions et les concepts retenus pour la suite de cet essai.

4.1 Limites

Quelques limites ont été établies afin que le calcul final soit aisé à appliquer pour tous les acteurs qui œuvrent dans le domaine des changements climatiques. Une équation valide d'un point de vue théorique, mais ardue à mettre en place, ne serait d'aucune utilité.

Dans un premier temps, les outils requis devaient être gratuits et reposer sur le principe des logiciels libres. Les licences des logiciels spécialisés sont souvent onéreuses et ne sont pas à la portée de toutes les organisations. Ainsi, tout le travail a été effectué sur Linux et sur la suite LibreOffice. Pour ce qui est des logiciels plus techniques, QGIS a été privilégié pour la géomatique et les calculs statistiques ont été accomplis grâce aux bibliothèques scientifiques offertes en Python et en R. Puisque de nombreuses ressources en ligne existent, des connaissances approfondies en programmation ne sont pas obligatoires. De plus, il n'est pas nécessaire de maîtriser les deux langages. Afin de réduire les erreurs, tous les calculs ont été exécutés au préalable avec Python, puis validés avec R. (QGIS Development Team, 2019; Linux Mint Team, 2020; Python Core Team, 2020; R Core Team, 2020; The Document Foundation, 2020)

Dans un deuxième temps, les données brutes devaient être disponibles immédiatement et gratuitement. Une formule qui reposerait sur une collecte exhaustive ou payante de données pourrait empêcher les organisations qui ne possèdent pas les ressources humaines et financières à procéder à cet exercice.

Finalement, la démarche complète devait pouvoir s'effectuer par une seule personne dans un laps de temps raisonnable. Il est évidemment préférable de constituer une équipe multidisciplinaire pour accomplir le travail, mais dans un contexte de restrictions budgétaires et de pénurie de main-d'œuvre, ce n'est pas toujours réalisable.

4.2 Équation

L'équation du cinquième rapport du GIEC, soit $V = S - CA$, est celle retenue pour le présent exercice. Évidemment, l'aléa pour lequel la vulnérabilité est déterminée a été considéré lors du calcul de la sensibilité et de la capacité d'adaptation, mais les probabilités d'occurrence n'ont pas été quantifiées. L'objectif de ce travail est de permettre d'effectuer un choix éclairé par les décideurs. Ainsi, l'introduction d'une variable numérique pour l'aléa n'ajoute pas d'informations supplémentaires pertinentes. Par exemple, si pour une région donnée la fourchette de la hausse des températures oscille entre 2 et 6 °C selon le scénario RCP retenu, cela ne change rien au fait que cette région doit se préparer à des vagues de chaleur plus intenses. Une valeur chiffrée ne ferait qu'amplifier l'incertitude sur le résultat et ne faciliterait pas une prise de décision plus juste.

4.3 Méthodes statistiques

L'ACP a été retenue pour traiter les données. Celle-ci est fréquemment utilisée dans la littérature pour les calculs de la vulnérabilité. C'est une méthode reconnue et efficace. Cette dernière repose sur des principes d'algèbre linéaire et sur les propriétés des matrices. L'objectif de cette méthode est de réduire les dimensions des données en les réunissant par composantes principales afin de ne pas perdre trop d'informations. L'équation détaillée se retrouve à l'annexe 1. La démonstration mathématique, bien qu'intéressante, ne fera pas l'objet d'un examen approfondi, puisque ce n'est pas le sujet central de cet essai. De plus, la preuve de son utilité a déjà été faite à de nombreuses reprises. (Smith, 2002; Reid et al., 2009; Zhu et al., 2014; Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich et Zêzere, 2015; Jolliffe et Cadima, 2016; Lee, 2018; Nayak et al., 2018; Uddin et al., 2019)

Cependant, afin de faciliter la compréhension de cette technique, un exemple fictif simple à deux dimensions a été produit à l'aide de Python (Python Core Team, 2020). La figure 4.1 montre la distribution d'un échantillon de 100 points aléatoires qui sert de base pour l'explication de cette méthode.

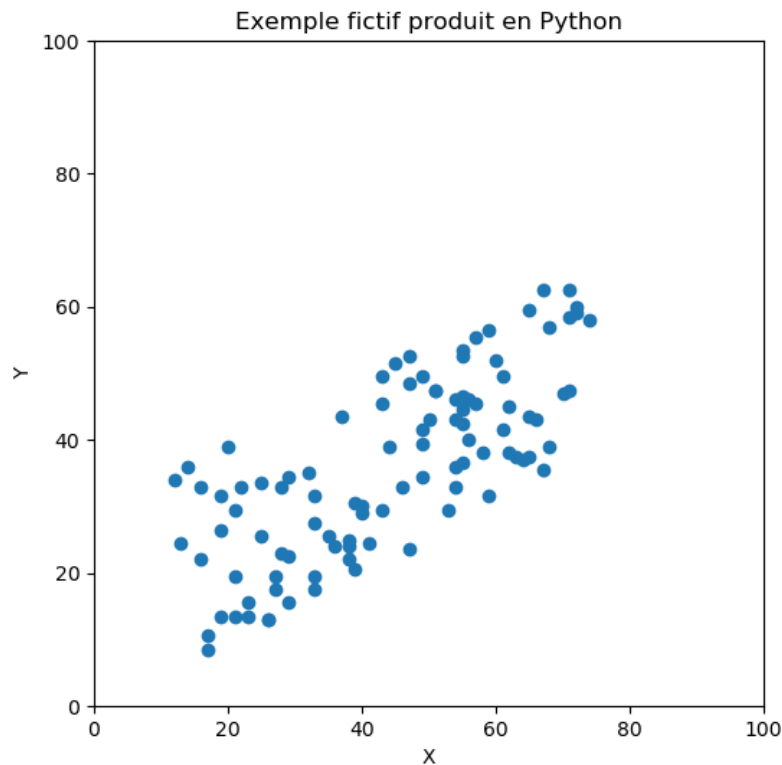


Figure 4.1 Exemple fictif pour illustrer graphiquement une analyse en composante principale (produit avec : Python, 2020)

L'objectif d'une ACP est de trouver un axe qui maximise la variance des points à l'aide du concept des vecteurs propres (*eigenvector*) et des valeurs propres (*eigenvalue*). Pour le présent exemple, une matrice de corrélation avec les données initiales a été construite, puis une décomposition en valeurs singulières a été effectuée. Cette décomposition produit les vecteurs propres ainsi que leurs valeurs qui servent de base pour établir les composantes de l'analyse. Dans la figure 4.2, le vecteur en vert représente la composante principale qui permet d'expliquer un maximum de la variance, alors que le vecteur en rouge est la deuxième composante qui permet d'expliquer une portion de la variance. La différence de longueur entre les deux flèches est à l'échelle et correspond à la valeur propre de chaque vecteur. (Jolliffe et Cadima, 2016; Lee, 2018)

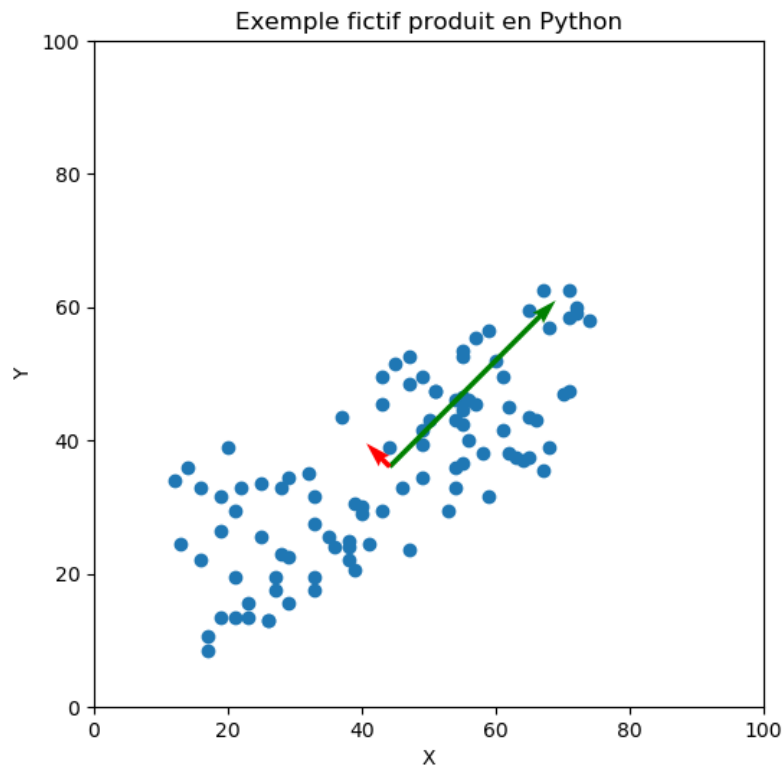


Figure 4.2 Représentation graphique des vecteurs propres et de leurs valeurs propres pour une analyse en composante principale (produit avec : Python, 2020)

Le tableau 4.1 permet de visualiser ces différences de façon numérique.

Tableau 4.1 Valeurs des vecteurs propres et variance des points de l'exemple fictif d'une analyse en composante principale (produit avec : Python, 2020)

Composantes	Valeur des vecteurs propres	% de la variance	% de la variance cumulée
1 (vert)	1,754	87,68	87,68
2 (rouge)	0,246	12,32	100,00

Plusieurs techniques existent pour déterminer combien de composantes doivent être conservées. Le critère de Kaiser suggère de garder toutes les composantes dont la valeur du vecteur propre est supérieure à 1. Il est également possible de retenir toutes les composantes qui possèdent au moins 10 % de la variance ou 70 % de la variance cumulée. Le test du coude (*scree plot test*) est une méthode visuelle qui laisse l'observateur décider à partir de quel point sur le graphique la courbe s'aplatit afin de considérer toutes les composantes qui précèdent ce point. L'analyse parallèle consiste à simuler à des centaines de reprises

une ACP avec le même nombre d'indicateurs, mais avec des chiffres aléatoires dans la matrice pour estimer les valeurs des vecteurs propres à conserver. Il n'y a pas de consensus dans la littérature sur le meilleur critère. Ultimement, c'est une question de jugement et d'interprétation selon les données et les situations. Ces critères sont des indications, et non des règles strictes à suivre aveuglément. (Brown, 2009; Jolliffe et Cadima, 2016; Lee, 2018)

Finalement, il est possible d'ajouter une rotation au vecteur propre, de manière oblique ou orthogonale, afin de faciliter la lecture des résultats. La rotation *varimax* est la plus souvent utilisée et est privilégiée pour cet essai. (Jolliffe et Cadima, 2016; Lee, 2018)

L'exemple dans cette section est trivial et ne sert qu'à visualiser le concept d'ACP qui est difficile à représenter graphiquement après la troisième dimension. Une analyse statistique de ce type ne s'applique pas à toutes les situations et n'aurait pas de sens pour traiter si peu de données.

4.4 Regroupement des données

Plusieurs méthodes de regroupement des données (*data clustering*) dans les chapitres précédents avaient recours à des seuils fixes, comme les quintiles qui divisent la plage de valeurs en cinq parties égales. Cependant, cette approche possède la faiblesse de réunir des réalités qui ne sont pas du même ordre de grandeur. Le tableau 4.2 permet de visualiser la différence entre l'utilisation de terciles et une technique de regroupement des données comme le *Jenks Natural Breaks*. Chaque couleur différente représente un regroupement (*cluster*). Le nombre pertinent de regroupements pour le *Jenks Natural Breaks* s'établit à l'aide de divers tests. La sous-section 6.1.3 explique en détail la procédure avec un jeu de données réelles.

Tableau 4.2 Comparaison entre le regroupement des données par la méthode des terciles et par la méthode du *Jenks Natural Breaks* (produit avec : Python, 2020)

Valeurs fictives	15	20	35	50	75	500	600	1 500	1 600
Tercile									
<i>Jenks Natural Breaks</i>									

Plusieurs techniques existent, comme le *K-means clustering*, le *DBScan*, le *Hierarchical Clustering* ou le *Gaussian Mixture Models*. Il est possible d'utiliser différents algorithmes selon la distribution des données. L'avantage du *Jenks Natural Breaks* est son intégration dans les logiciels de géomatique, ce qui réduit le nombre de manipulations nécessaires pour produire des cartes. De plus, cette méthode sied bien au jeu de données tiré du recensement de Statistique Canada, ce qui explique son utilisation pour la suite de cet essai. (Khan, 2012; Chakraborty, Nagwani et Dey, 2014; Jung, Kang et Heo, 2014)

4.5 Aléas

Les indicateurs de sensibilité et d'adaptation n'ont de sens que s'ils sont liés à un aléa. Ainsi, il est primordial de bien cibler l'enjeu climatique avant de se lancer dans un calcul de vulnérabilité. Plusieurs impacts néfastes sur la santé ont été associés aux changements climatiques dans le monde. Les inondations, les vagues de chaleur, les sécheresses, les feux, la montée des océans et les événements climatiques extrêmes sont responsables de nombreux problèmes au niveau cardiovasculaire, respiratoire, infectieux et de la santé mentale, sans oublier les risques pour l'accès à l'eau potable et la sécurité alimentaire. (Watts et al., 2015) En Ontario, le département de *Simcoe Muskoka* a retenu les extrêmes de température, les événements climatiques extrêmes, la dégradation de la qualité de l'air, la contamination de l'eau et de la nourriture, les zoonoses et l'exposition aux rayons UV. (Levison et al., 2017; Levison et al., 2018) La santé publique de l'Estrie a identifié quatre problématiques principales spécifiques à son territoire, soit les vagues de chaleur, les inondations, les allergènes et les zoonoses. (Santé publique de l'Estrie, 2016) Cet essai se concentre sur les vagues de chaleur, mais la même démarche s'applique pour tous les types d'aléas.

5. INDICATEURS DE SENSIBILITÉ ET DE CAPACITÉ D'ADAPTATION POUR LES VAGUES DE CHALEUR

Les chapitres précédents ont permis d'établir les bases d'un plan d'adaptation et d'une formule mathématique pour calculer la vulnérabilité. Ce chapitre souligne les indicateurs à retenir pour la sensibilité et la capacité d'adaptation pour les vagues de chaleur. La sélection de ces derniers s'avère critique, car de mauvais indicateurs dans un bon modèle ne produiront pas de résultats valides.

5.1 Définition d'une vague de chaleur

Environnement Canada détermine une vague de chaleur comme une période où les températures dépassent 32 °C pour une durée de trois jours ou plus. (Health Canada, 2012) La santé publique de l'Ontario parle de vagues de chaleur lorsque la température atteint 31 °C le jour et 20 °C la nuit ou lorsque la température est supérieure à 40 °C avec l'humidex pour deux jours ou plus. (Levison et al., 2017) La santé publique de l'Estrie définit une vague de chaleur lorsque la température est supérieure à 31 °C le jour et 18 °C la nuit durant au moins deux jours consécutifs. Ces épisodes augmenteront avec les changements climatiques. (Santé publique de l'Estrie, 2016)

Devant un nombre de définitions très variables d'une instance à l'autre, une méta-analyse s'est penchée sur le meilleur indicateur pour prédire la mortalité pendant une vague de chaleur. Les auteurs discutent de l'importance de ne pas utiliser un seuil trop haut (comme le 99^e percentile des maximums de température) ou trop bas pour ne pas gaspiller de précieuses ressources lors du déploiement d'une alerte pour la chaleur. Les chercheurs concluent que cette valeur doit être établie selon les réalités locales et qu'un seuil universel n'est pas applicable. (Xu, Fitzgerald, Guo, Jalaludin et Tong, 2016).

5.2 Impacts sur la santé

Les conséquences des vagues de chaleur sur la santé varient en intensité. Des conditions mineures qui ne nécessitent pas une hospitalisation comme des crampes musculaires et une légère déshydratation sont susceptibles d'affecter toute la population. Cependant, elles peuvent aussi engendrer des coups de chaleur et une mortalité accrue. Lors de la vague de chaleur de 2003 en France, plus de 15 000 décès ont été attribués à la canicule. (Agence nationale de Santé Publique [ANSP], 2017) De plus, il y a un risque d'exacerbation des conditions chroniques préexistantes comme les maladies cardiovasculaires et pulmonaires, ainsi que les troubles neurologiques. (Health Canada, 2012; Warren et Lemmen, 2014; Santé publique de l'Estrie, 2016)

5.3 Indicateurs de sensibilité pour la population

La proportion de personnes âgées est un indicateur qui est régulièrement soulevé dans la littérature pour décrire les populations sensibles. (Canoui-Poitrine, Cadot et Spira, 2006; Thomas et al., 2012; Health Canada, 2012; Chen, Doherty, Coffee, Wong et Hellmann, 2016; Santé publique de l'Estrie, 2016; Levison et al., 2017; Barrette et al., 2018a; Mayrhuber et al., 2018) Le seuil qui permet de déterminer à quel moment un individu est considéré comme âgé est difficile à établir. Les études épidémiologiques démontrent une augmentation de la prévalence des maladies cardiaques et vasculaires, du cancer, du diabète et des maladies pulmonaires obstructives chroniques à partir de 65 ans. Cependant, une seconde hausse est notable dans le groupe des 75 ans et plus. (MacNee, Rabinovich et Choudhury, 2014; Solé-Auró, Michaud, Hurd et Crimmins, 2015)

La consommation de médicaments affecte la capacité d'affronter les vagues de chaleur. Par exemple, lors de la canicule de 2003 en France, plus de 1 500 décès étaient attribuables à une déshydratation sévère malgré l'abondance des sources d'eau. Cela peut s'expliquer par les effets secondaires de certains médicaments qui suppriment la soif et dérèglent la thermorégulation. Parmi ceux-ci, certains antipsychotiques, sympathomimétiques, agonistes sérotoninergiques, anticholinergiques, antiépileptiques, antihistaminiques et bêta-bloquants peuvent causer des problèmes chez des patients avec des prédispositions particulières. (Stöllberger, Lutz et Finsterer, 2009) Un excellent document de l'INSPQ a été produit à ce sujet en 2015.

***** Mise en garde : Il faut toujours consulter un professionnel de la santé avant de modifier ses habitudes ou la prise de médicaments. Ce paragraphe n'est qu'à titre indicatif et ne se veut en aucun cas des recommandations à suivre lors d'une vague de chaleur. *****

Une étude canadienne a démontré que la consommation accrue de médicaments est corrélée avec l'augmentation de la prévalence des diverses maladies en fonction de l'âge. Il est possible d'observer deux hausses significatives, l'une à 65 ans et l'autre à partir de 75 ans, ce qui renforce la notion qu'un seuil est difficile à établir. (McPherson, Ji, Hunt, Ranger et Gula, 2012) Pour cette raison, certaines lignes directrices en médecine pondèrent les différents intervalles d'âge. Le meilleur exemple est le CHA₂DS₂-VASc qui détermine le risque embolique chez les patients atteints de fibrillation auriculaire. Ceux âgés entre 65 ans et 74 ans obtiennent un score de 1, alors que ceux de plus de 75 ans reçoivent un score de 2. (Shariff, Aleem, Singh, Li et Smith, 2012)

L'utilisation de drogues illicites comme la cocaïne ou la méthamphétamine contribue à perturber les mécanismes de régulation de l'organisme et à diminuer la capacité de s'adapter à des températures élevées. Ainsi, les toxicomanes sont plus sensibles que la population générale. (Stöllberger et al., 2009)

Une étude sur la vague de chaleur française de 2003 a démontré que les personnes seules et celles vivant dans des ilots de chaleur étaient plus à risque de décéder. (Canoui-Poitrine, Cadot et Spira, 2006) Une étude américaine arrive à des conclusions similaires pour la région de l'Arizona (Eisenman et al., 2016) et des revues de littérature soulignent ces éléments récurrents (Bouchama et al., 2007; Mayrhuber et al., 2018).

Trouver un seuil dans la population jeune pour déterminer un degré de sensibilité significatif n'est pas aisé et s'avère aussi problématique que pour les aînés. Si la majorité des études et des lignes directrices s'entend pour inclure les 0 à 4 ans dans la population sensible à cause de leur capacité limitée de communication et de thermorégulation (INSPQ, 2010; Health Canada, 2012; Santé publique de l'Estrie, 2016; Sheffield, Herrera, Kinnee et Clougherty, 2018), le cas des 5 à 14 ans est moins clair dans la littérature. D'ailleurs, le Plan national canicule de la France et le plan de la Ville de Montréal définissent les jeunes enfants de 0 à 6 ans. (ANSP, 2017; Ville de Montréal, 2017) Certaines études n'observent pas de décès accrus dans ce groupe d'âge, alors que d'autres voient une tendance comme le démontre une revue de littérature sur le sujet (Xu et al., 2014). L'un des mécanismes proposés pour expliquer une hausse de mortalité est l'augmentation des concentrations d'ozone troposphérique pendant les vagues de chaleur. Ce polluant est toxique pour les poumons, surtout chez les enfants qui n'ont pas un système respiratoire complètement développé. Ces derniers ne peuvent pas être comparés aux adultes, car le ratio surface/volume possède un grand impact sur la quantité d'air respiré par unité de masse corporelle. Par conséquent, il n'est pas recommandé de prendre l'effet des polluants environnementaux chez les adultes pour les extrapoler aux plus jeunes. (Bateson et Schwartz, 2007; Kajekar, 2007; Reid, Snowden, Kontgis et Tager, 2012) De plus, certaines données montrent que les jeunes ont moins de probabilités de mourir dans un épisode de chaleur extrême, mais que la morbidité est à la hausse pour ce groupe d'âge. Se fier uniquement au taux de décès peut masquer des dimensions importantes du problème. (Vanos, 2015)

Les ménages défavorisés sur le plan socio-économique sont fréquemment mentionnés. Les indicateurs utilisés pour décrire cette réalité varient dans la littérature, mais ils regroupent généralement les immigrants, les ménages sous le seuil de la pauvreté, le degré de scolarisation et les ménages seuls. (Kovats et Hajat, 2008; Hondula et al., 2012; Harlan, Declet-Barreto, Stefanov et Petitti, 2013) Ces éléments sont

cohérents avec l'indicateur de défavorisation matérielle conçu par l'INSPQ qui inclut les personnes de plus de 15 ans sans diplôme d'études secondaires, la proportion de gens occupant un emploi, le revenu moyen, les ménages seuls, les personnes séparées, divorcées ou veuves et les familles monoparentales. (INSPQ, 2019a).

Sans surprise, les lignes directrices des différentes instances nord-américaines de santé publique identifient des variables similaires à celles répertoriées dans la littérature. Les 0 à 4 ans, les 65 ans et plus, les patients qui sont atteints de maladies chroniques ou de maladies mentales, les toxicomanes, les personnes seules ou en perte d'autonomie, les populations défavorisées sur le plan socio-économique, les immigrants récents ainsi que les travailleurs extérieurs sont tous des éléments consensuels. (INSPQ, 2010; Health Canada, 2012; CDC, 2015; Santé publique de l'Estrie, 2016; Levison et al., 2017)

Le tableau 5.1 synthétise les indicateurs tirés de la littérature qui sont expliqués dans les paragraphes précédents.

Tableau 5.1 Indicateurs de sensibilité pour les vagues de chaleur recensés dans la littérature

Indicateurs
Personnes âgées de 65 ans et plus
Personnes âgées de 75 ans et plus
Patients polymédicamentés
Patients avec des maladies chroniques
Toxicomanes
Personnes vivant dans un ilot de chaleur
Enfants âgés de 0 à 4 ans
Enfants âgés de 5 à 14 ans
Personnes sous le seuil de la pauvreté
Personnes vivant seules
Ménages monoparentaux
Personnes sans diplôme d'études secondaires
Immigrants récents
Travailleurs extérieurs

Cependant, puisque certains indicateurs ne sont pas disponibles avec un niveau suffisant de précision, ceux-ci ne pourront pas être utilisés dans l'analyse. De plus, l'absence d'une littérature claire laisse place à des choix très subjectifs. Il n'existe pas un modèle étalon, ce qui ouvre la porte aux débats et aux critiques. Dans l'attente de meilleures données probantes qui émanent de la recherche, certaines zones grises demeurent. D'ailleurs, les statistiques en provenance du Québec sont très limitées, car il y a eu peu de vagues de chaleur lors de la dernière décennie et celles-ci n'ont pas entraîné de nombreux décès, ce qui complexifie la tâche de trouver un lien de cause à effet entre les indicateurs et la mortalité. Il en va de

même pour les indicateurs reliés à la morbidité. (INSPQ, 2017a; INSPQ, 2019b) Le tableau 5.2 présente les variables qui sont retenues pour le présent essai, ainsi que la source d’où l’information est tirée.

Tableau 5.2 Indicateurs de sensibilité pour les vagues de chaleur retenus pour l’essai

Indicateurs	Sources
% de ménages en location	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de ménages composés de personnes seules	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de ménages à faible revenu	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour le logement	Recensement 2016 de Statistique Canada
% du territoire situé dans un îlot de chaleur	Produit par l’INSPQ et la CERFO disponible sur Données Québec (2012)
% de la population de 65 ans et plus	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de la population inactive	Recensement 2016 de Statistique Canada
Ratio de la population de 75 ans et plus/population de 65 ans et plus	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de la population ignorant le français et l’anglais	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de logements de taille inadéquate	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de nouveaux immigrants (2011 à 2016)	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de ménages monoparentaux	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de la population de 5 à 9 ans	Recensement 2016 de Statistique Canada
% de la population de 0 à 4 ans	Recensement 2016 de Statistique Canada

Des compromis ont été effectués pour essayer de capter toutes les dimensions de la sensibilité. Ainsi, l’ajout d’un ratio de la population de 75 ans et plus/la population de 65 ans et plus permet de considérer la fragilité qui ressort davantage chez les 75 ans et plus, sans exclure pour autant les plus de 65 ans où l’on observe une sensibilité supérieure à la population plus jeune.

De la même façon, la population jeune a été divisée en deux groupes d’âge, les 0 à 4 ans pour respecter les lignes directrices et les 5 à 9 ans pour tenir compte des études qui démontrent un impact non négligeable sur cette tranche d’âge. Il aurait été envisageable d’étendre la plage jusqu’à 14 ans, mais puisque l’idée d’inclure des jeunes de plus de 4 ans n’est pas supportée par les lignes directrices, un compromis a été fait pour ne pas surreprésenter cette population. Il aurait été possible de prendre les 0 à 9 ans, mais plusieurs commentaires reçus par des experts durant la rédaction de cet essai ont souligné l’importance de retrouver explicitement la variable 0 à 4 ans, car celle-ci est admise par la communauté scientifique. Cette distinction ajoutera de l’information sur le résultat cartographique sans affecter le calcul final.

Pour ce qui est des personnes inactives ou seules, ces indicateurs ont été choisis pour tenir compte de l’isolement social. Bien que ces variables soient imparfaites, il est raisonnable d’estimer qu’une personne

seule qui ne travaille pas ou qui n'étudie pas aura un réseau social moins étendu que la moyenne de la population. De plus, les ménages monoparentaux ou locataires ont été inclus, puisqu'ils sont généralement reconnus pour être plus limités au niveau des ressources pour affronter les aléas.

Les ménages à faible revenu, la proportion des ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour leur logement et les logements de taille convenable selon les définitions de Statistique Canada ont été retenus afin d'ajouter de la précision aux autres variables. Les ménages à faible revenu sont basés sur la mesure de faible revenu qui calcule un revenu qui équivaut à 50 % du revenu médian canadien après les taxes, ajusté pour la taille des ménages. Puisque les données du recensement couvrent l'ensemble du Canada, ces dernières ne captent pas toutes les subtilités régionales. L'indicateur qui souligne les ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus apporte une dimension plus locale. En effet, un secteur où le logement est abordable permet de dégager une marge financière malgré un faible revenu. Enfin, la mesure de logements de taille inadéquate établit si le logement possède suffisamment de chambres à coucher pour accommoder la composition du ménage qui y habite. Cette donnée met en lumière des logements inappropriés qui démontrent une précarité financière de ses occupants ou une absence de logements convenables dans la région. (Statistique Canada, 2019) La présence d'îlots de chaleur a également été considérée pour bien qualifier l'environnement dans lequel la population évolue.

Les immigrants récents et la connaissance des langues officielles ont été retenus, car les nouveaux arrivants ne sont pas toujours informés des ressources disponibles, ce qui complexifie l'adaptation aux aléas. L'incompréhension des langues officielles rend difficile la communication entre les autorités et la population.

La toxicomanie, le travail extérieur, le fait d'être sans-abris, la prise de médicaments et l'état de santé de la population représentent tous des variables importantes, mais pour lesquelles il n'existe malheureusement pas de données facilement accessibles avec un niveau de précision de l'ordre des aires de diffusion.

Les chercheurs de l'Atlas de la vulnérabilité ont développé, en collaboration avec l'INSPQ, une couche sur leur cartographie concernant les maladies chroniques susceptibles d'exacerber les effets d'une vague de chaleur. Par contre, cet indicateur n'a pas été intégré dans leur calcul final, car il n'ajoutait rien à leur modèle statistique. (Barrette et al., 2018a) La carte est aisément accessible, mais les données brutes pour la générer ne le sont pas. (Barrette et al., 2018b) Puisque la facilité d'accès aux données brutes était

importante dans les limites de cet essai, cette variable n'a pas été considérée pour l'élaboration de ce modèle.

Certains aspects statistiques ont également influencé le choix des indicateurs. Ces notions sont abordées en profondeur dans le chapitre 6.

5.4 Indicateurs de capacité d'adaptation

Une revue de littérature récente souligne l'absence de données probantes afin d'appuyer des recommandations claires pour l'adaptation aux vagues de chaleur. Les politiques adoptées par les autorités se déclinent généralement sous forme de bouquets de mesures, ce qui complexifie la tâche d'isoler l'effet individuel de chaque initiative. De plus, puisque chaque épisode est unique, la relation de cause à effet entre l'aléa et la stratégie d'adaptation demeure ténue. (Mayrhuber et al., 2018) Par conséquent, les solutions présentées dans cette section sont supportées par des opinions d'experts, mais ne permettent pas d'établir une efficacité chiffrée de la réduction de la mortalité. (CDC, 2017)

Depuis l'importante canicule de 2003 qui a causé 15 000 décès en France, une diminution de la mortalité a été constatée grâce à l'implantation d'un Plan national canicule. Selon des modèles statistiques fondés sur les données de 2003, la canicule de 2006 a occasionné trois fois moins de surmortalité que l'épisode précédent. Néanmoins, plus de 3 300 personnes sont décédées lors de la canicule de 2015, ce qui confirme qu'il reste encore du travail à faire. Sur une note encourageante, la vague de chaleur de 2016 qui a été particulièrement intense a entraîné seulement 700 décès supplémentaires, ce qui démontre une progression positive de la situation. Ce plan s'articule autour de quatre axes.

1. La prévention des effets d'une canicule nécessite de mobiliser les ressources sur le terrain pour préparer les personnes vulnérables et la population aux conséquences d'une vague de chaleur.
2. La surveillance des conditions météorologiques permet d'émettre des alertes afin d'aviser les régions sur le niveau d'intensité de l'aléa à venir.
3. Les campagnes d'information, de sensibilisation et d'éducation (ISÉ) sont centrales à la diffusion des consignes lors d'une vague de chaleur. Des gabarits sont disponibles pour tous les intervenants.

4. Un suivi rigoureux est mis en place après chaque épisode de chaleur intense afin d'affiner la stratégie pour s'améliorer dans le futur. (ANSP, 2017)

Quelques mesures spécifiques sont particulièrement intéressantes. La création d'un registre de personnes vulnérables facilite le contact direct avec ces dernières afin de vérifier qu'elles possèdent les ressources nécessaires pour affronter des conditions anormales. Le déploiement du « plan bleu » qui repose sur des protocoles et des ententes entre divers partenaires permet une intervention rapide en cas de crise. Chaque établissement de santé qui héberge des personnes âgées doit comporter au moins une pièce fraîche. Le « plan blanc » prévoit des stratégies en cas d'affluence des patients vers les établissements de santé lorsque les mesures préventives se révèlent insuffisantes. L'objectif de toutes ces actions est d'assurer une coordination entre les différents paliers de gouvernement du niveau local à national. (ANSP, 2017)

Une revue de littérature a comparé les plans de divers pays de l'Union européenne. Ces derniers s'appuient sur des principes similaires à celui de la France, mais ajustent les détails selon les ressources disponibles, le climat, la structure du système de santé et l'organisation politique. Les auteurs soulignent l'importance des campagnes d'ISÉ, d'un système d'alerte efficient qui utilise un seuil de déclenchement adéquat en fonction de la réalité locale, d'une bonne coordination entre les différents paliers gouvernementaux et d'un suivi régulier des diverses interventions pour assurer leur efficacité. (Casanueva et al., 2019) Une approche comparable est proposée du côté américain par le CDC. (CDC, 2017)

Health Canada a publié un guide en 2012 intitulé *Heat Alert and Response Systems to Protect Health (HARS): Best Practices Guidebook*. Ce guide mentionne les thèmes pour les actions préventives, comme la réduction des gaz à effet de serre (GES), l'atténuation des îlots de chaleur, la promotion de saines habitudes de vie, une modification des politiques qui visent le transport, une amélioration du tissu social et une évaluation de la vulnérabilité à la chaleur. Puisque ces stratégies possèdent leurs limites, il est nécessaire de produire un plan d'intervention qui contient un protocole d'alerte, un plan de réponse communautaire, un plan de communication et un plan d'évaluation des mesures mises en place. L'objectif ultime est d'obtenir une mobilisation et un engagement durable de la communauté face à ce problème. (Health Canada, 2012) Cette approche est appliquée à différentes échelles parmi les provinces canadiennes. Le Québec se démarque grâce à l'exhaustivité de ses analyses et de plusieurs initiatives comme l'Atlas de la vulnérabilité. (Austin et al., 2015)

Le tableau 5.3 résume les éléments utilisés pour augmenter la capacité d’adaptation et qui se retrouvent dans la majorité des plans d’alerte à la chaleur. Chacun d’entre eux sera expliqué en détail par la suite pour bien situer leur rôle dans le calcul de la vulnérabilité qui suivra.

Tableau 5.3 Stratégies d’adaptation contre les vagues de chaleur recensées dans la littérature

Stratégies
1) Surveillance en temps réel de la météorologie, système d’alerte et plan d’action
2) Cartographie des zones vulnérables sur le territoire
3) Campagne d’information, de sensibilisation et d’éducation (ISÉ)
4) Registre de personnes sensibles et solidification du réseau social
5) Diminution des ilots de chaleur
6) Utilisation de la climatisation à domicile
7) Centre de refroidissement

1) La surveillance en temps réel accompagnée d’un système d’alerte et d’un plan d’action constitue le pilier central des stratégies contre les vagues de chaleur partout à travers le monde et le Québec n’y échappe pas. C’est l’INSQP qui émet des avertissements de chaleur extrême grâce au Système de surveillance et de prévention des impacts sanitaires des événements météorologiques extrêmes (SUPREME) en se basant sur les données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). La direction de la santé publique des régions concernées fait circuler cette information auprès des intervenants du réseau de la santé et des services sociaux (RSSS) de leur territoire afin que ces derniers puissent prendre les actions appropriées sur le terrain. Le Ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) coordonne les efforts au niveau provincial au besoin et émet les balises pour les plans régionaux. (INSQP, 2017b; Ministère de la Santé et des Services sociaux [MSSS], 2019)

2) La géomatique est un puissant outil pour cartographier la vulnérabilité, ce qui explique que cette méthode est très répandue dans la littérature. La valeur ajoutée de cette démarche, bien que plus fastidieuse que la production d’une simple matrice globale, semble justifiée selon plusieurs auteurs. (Warren et Lemmen, 2014; Albers et al., 2015; CDC, 2015; Mees, Driessen et Runhaar, 2015; OMS, 2015; ULA, 2015; Eisenman et al., 2016; Van de Ven et al., 2016; Barrette et al., 2018a)

3) Les campagnes d’ISÉ sont essentielles pour transmettre les bonnes informations au public. (Health Canada, 2012; Warren et Lemmen, 2014; ANSP, 2017; Casanueva et al., 2019; MSSS, 2019) Cependant, la diffusion des consignes ne signifie pas qu’elles sont comprises ou appliquées. Le niveau de connaissance des langues officielles, de littératie et d’éducation influence grandement le comportement des gens. De plus, il peut y avoir une fatigue du message si ce dernier est répété trop souvent. Malheureusement, ce sont les personnes vulnérables qui bénéficient le moins de ces campagnes. Par conséquent, l’efficacité de

la communication de masse se doit d'être relativisée, même si elle demeure importante. (CDC, 2017; Mayrhuber et al., 2018)

4) La création d'un registre de personnes sensibles facilite le repérage de ces dernières pour intervenir plus adéquatement. Un système de jumelage ou de surveillance de voisinage renforce le tissu social et augmente la résilience dans les quartiers. (Warren et Lemmen, 2014; ANSP, 2017; Casanueva et al., 2019) Suite à la vague de chaleur de 2010, une étude montréalaise a noté que la moitié des patients décédés souffrant de maladie mentale avait eu une interaction avec de la famille ou un professionnel dans les 24 heures précédant leur mort. Les auteurs soulignent l'importance de la qualité de l'intervention pour que cette mesure soit efficace. (Price, Perron et King, 2013) Par contre, une revue de littérature a démontré que l'implantation d'une meilleure connectivité sociale pour la population générale possédait un effet protecteur clair. (Bouchama et al., 2007) Plus de données sont nécessaires pour bien déterminer les interventions optimales en fonction des sous-groupes sensibles identifiés.

5) L'atténuation des îlots de chaleur est une mesure qui fait consensus et qui comporte de nombreux bienfaits. (Health Canada, 2012; Warren et Lemmen, 2014; Santé publique de l'Estrie, 2016; CDC, 2017; Levison et al., 2017; Mayrhuber et al., 2018; Casanueva et al., 2019) Une modélisation a permis d'établir que si la Ville de Toronto recouvrait 25 % de ses toits avec de la verdure au centre-ville, la température estivale pourrait baisser de l'ordre de 1 à 2 °C. Règle générale, il est estimé que la température diminue de 0,04 à 2 °C par pourcentage de couverture végétale dans un contexte urbain. D'importants gains énergétiques peuvent être obtenus pour les bâtiments qui adoptent des architectures vertes, car elles minimisent les besoins de climatisation. De nombreux co-bénéfices s'ajoutent aux avantages reliés à la température comme la séquestration du carbone, la réduction des eaux de ruissellement, la purification de l'air et l'esthétisme. (Vergiete et Labrecque, 2007; Giguère, 2009)

Néanmoins, les coûts initiaux prohibitifs pour modifier le cadre bâti expliquent pourquoi les changements sont extrêmement lents malgré un bénéfice unanime dans la littérature. La facture élevée provient de la nécessité de renforcer les vieilles structures qui ne sont pas conçues pour recevoir le poids de la végétation. Par contre, les décideurs auraient intérêt à légiférer pour obliger toutes les nouvelles constructions à intégrer un toit vert qui ne coûte pas plus cher qu'un toit traditionnel lorsque l'on planifie dès le départ son implantation. (Trottier, 2008; Cascone, Catania, Gagliano et Sciuto, 2018; Shafique, Kim et Rafiq, 2018) Une solution moins onéreuse pour le cadre bâti est de peindre les toits en blanc afin

d'augmenter l'albédo et de réduire l'absorption de la chaleur. Cependant, cette méthode est moins efficace que les toits verts et ne confère pas de nombreux co-bénéfices. (Giguère, 2009)

6) L'installation de climatiseurs domestiques peut paraître logique pour atténuer les effets des vagues de chaleur et a démontré un bénéfice sur la diminution de la mortalité, mais plusieurs bémols existent. Une utilisation concomitante d'un grand nombre de climatiseurs ajoute un stress sur le réseau d'alimentation électrique et peut causer une surcharge qui entraîne des pannes de courant généralisées. De plus, certaines personnes ne se servent pas de leur air conditionné à la maison pour économiser des coûts d'électricité. (Harlan et al., 2013; Eisenman et al., 2016; CDC, 2017; Mayrhuber et al., 2018) Les climatiseurs contribuent à exacerber les changements climatiques, car le recours aux énergies non renouvelables dans certaines régions relâche une importante quantité de carbone dans l'atmosphère. De plus, ils contiennent des réfrigérants comme les hydrofluorocarbures (HFC) qui sont de puissants GES. La chaleur extirpée des bâtiments par les climatiseurs participe à l'effet des îlots de chaleur dans les villes densément peuplées. En cas de panne de courant, la population se retrouve plus vulnérable, puisqu'elle perd sa capacité d'adaptation. Cela peut être un pari dangereux avec la hausse de la demande en énergie pour la climatisation et l'intensification des vagues de chaleur. Quelques solutions existent comme la recherche pour des nouveaux réfrigérants, le développement des énergies renouvelables et l'utilisation des techniques de ventilation passive. Cependant, tout comme pour les toits verts, la modification de vieux bâtiments peut se révéler coûteuse et constituer une barrière pour changer la méthode pour rafraîchir les gens. (Dahl, 2013; Lundgren-Kownacki, Hornyanszky, Chu, Olsson et Becker, 2018)

7) Les centres de refroidissement réduisent le fardeau financier lié à un air conditionné, évitent de surcharger le réseau électrique et atténuent les émissions de GES. Par contre, ces derniers ne sont pas toujours fréquentés, car un stigma associé à la pauvreté peut limiter leur utilisation. De plus, plusieurs personnes âgées ne souhaitent ou ne peuvent pas quitter leur domicile. Cette initiative demeure difficile à évaluer, car il y a plusieurs centres de refroidissement non officiels, comme les centres commerciaux, les cinémas, les bibliothèques, les pharmacies, etc. Ainsi, même si un centre de refroidissement ouvert expressément pour contrer une vague de chaleur n'est pas très achalandé, cela ne signifie pas que les gens ne se rafraîchissent pas d'une autre manière. (Eisenman et al., 2016; CDC, 2017; Mayrhuber et al., 2018)

L'absence de données probantes quantitatives pour chiffrer chaque stratégie s'avère problématique pour effectuer un calcul de vulnérabilité qui doit prendre en compte la capacité d'adaptation. Une solution possible est présentée au chapitre 6.

Au-delà de l'aspect mathématique, l'adoption de mesures de type « sans regret » avec de nombreux co-bénéfices réduit le risque des investissements en la matière. Par exemple, même si un système de surveillance de voisinage qui renforce le tissu social se révélait moins efficace qu'anticipé pour contrer les vagues de chaleur, cette approche demeure très pertinente pour améliorer la santé en général selon une revue de la littérature. (Murayama, Fujiwara et Kawachi, 2012)

5.5 Mesures de suivi

Afin d'évaluer l'efficacité des stratégies d'adaptation ou l'ampleur des conséquences des vagues de chaleur, plusieurs éléments peuvent être mesurés. Il y a évidemment les décès, mais il y a aussi les hospitalisations liées à un diagnostic de chaleur, les admissions à l'urgence et le transport par ambulance. (Price et al., 2013; INSPQ, 2017a; Mayrhuber et al., 2018)

6. RÉSULTATS DU CALCUL DE LA VULNÉRABILITÉ À L'ÉCHELLE PROVINCIALE

Ce chapitre intègre toutes les notions abordées jusqu'à présent afin de calculer la vulnérabilité de chaque aire de diffusion de la province du Québec. Dans un premier temps, les indicateurs retenus pour la sensibilité sont examinés plus en profondeur, puis une pondération possible est explorée. Ensuite, différentes techniques de regroupement des données sont décrites avant de présenter les couches construites dans QGIS pour les analyses et les résultats cartographiques. Une comparaison est effectuée entre différentes méthodes de calcul et l'Atlas de la vulnérabilité. La capacité d'adaptation est étudiée, puis un calcul final de vulnérabilité est proposé.

6.1 Analyses et traitements des indicateurs choisis pour la sensibilité

Le traitement des données manquantes constitue une étape préalable à une ACP standard, car elles influencent fortement le résultat final. (Dray et Josse, 2015) Pour le recensement de 2016, 550 aires de diffusion possédaient des données manquantes, ce qui représente 4 % de l'échantillon. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces absences : certaines données ne sont pas diffusées pour des questions de confidentialité ou lorsque la qualité de la collecte d'information est insuffisante. (Statistique Canada, 2018b)

Il est possible de remplacer les valeurs manquantes par la moyenne de la colonne ou d'essayer d'interpoler les données. Cependant, plusieurs aires de diffusion ne possédaient aucune donnée, ce qui rendait l'interpolation inapplicable. De plus, insérer une moyenne n'aurait aucun sens, puisque les aires de diffusion avec des données manquantes sont généralement des cas spéciaux qui ne se compareraient pas à la moyenne. Ainsi, afin d'éviter d'introduire des valeurs artificielles, la solution retenue pour poursuivre les analyses a été de retirer les aires de diffusion avec des données incomplètes. La puissance statistique du calcul n'a pas été affectée, puisqu'il restait plus de 13 000 aires de diffusion après ces retraits. Après avoir nettoyé la matrice en supprimant les aires de diffusion avec des données incomplètes, les variables devaient être standardisées. En pratique, il est possible de calculer une matrice de corrélation directement et c'est l'approche qui a été préconisée dans le présent essai. (Smith, 2002; Dray et Josse, 2015; Jolliffe et Cadima, 2016; Lee, 2018)

L'exploration des données brutes permet de mieux contextualiser les résultats subséquents aux analyses statistiques. Le poids démographique de chaque indicateur en pourcentage à l'échelle de la province du Québec, illustré au tableau 6.1, mérite des considérations. Bien qu'il soit impossible de déterminer quel

indicateur contribue plus fortement à la sensibilité, il est possible d’observer que certaines réalités sont plus fréquentes que d’autres. La population inactive représente 35 fois le poids de la population ignorant les langues officielles. Évidemment, une personne peut appartenir à plusieurs indicateurs simultanément. Par exemple, une personne âgée, seule, immigrante, en location, avec un faible revenu et ignorant les langues officielles contribue à chacun de ces indicateurs. Cependant, un maximum de 0,9 % de la population peut se retrouver dans cette situation, puisque moins de 1 % de la population ne parle pas le français ou l’anglais. L’immigration récente ne représente que 2,6 % des données, ce qui constitue un poids 7 fois moins important que la population âgée de plus de 65 ans. Ainsi, dans la planification des actions pour diminuer la vulnérabilité, il est probable que des ressources supplémentaires soient attribuées aux aînés à cause de leur nombre plus considérable. Ceci ne signifie pas que l’un des deux groupes possède une plus grande valeur que l’autre. Ce calcul est strictement une observation quantitative, et non un jugement sur le groupe qui mérite le plus de ressources.

Tableau 6.1 Indicateurs retenus et poids démographique associé pour la province du Québec (compilation d’après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

Échelle	Indicateurs retenus	Poids démographique pour la province du Québec (%)
Ménages	% de ménages en location	38,6
	% de ménages composés de personnes seules	33,3
	% du territoire situé dans un ilot de chaleur	22,0
	% de ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour le logement	21,0
	% de ménages monoparentaux	10,7
	% de logements de taille inadéquate	3,8
Population	% de la population inactive	35,9
	% de la population de 65 ans et plus	18,3
	% de la population dans des ménages à faible revenu	14,6
	% de la population de 5 à 9 ans	5,7
	% de la population de 0 à 4 ans	5,4
	% de nouveaux immigrants (2011 à 2016)	2,6
	% de la population ignorant le français et l’anglais	0,9
	Ratio de la population de 75 ans et plus/population de 65 ans et plus	Non applicable

6.1.1 Choix du nombre de composantes principales retenues

Afin d’établir le nombre de composantes à retenir, la matrice de corrélation doit être décomposée en valeurs singulières. Cette opération permet d’obtenir la mesure des vecteurs propres ainsi que la variance associée à chacune des dimensions. Les résultats de cette procédure sur les 14 indicateurs choisis pour cet essai apparaissent au tableau 6.2. Comme mentionné à la section 4.3, il n’y a pas de méthodes définitives

pour déterminer le nombre de composantes à sélectionner et ces dernières peuvent se contredire. Par exemple, si l'on applique le critère de Kaiser qui retient les composantes dont la valeur du vecteur propre est supérieure à 1, il faudrait garder 3 composantes. Par contre, l'établissement d'un seuil pour préserver 70 % de la variance des données suggère plutôt de conserver 4 composantes. (Brown, 2009; Jolliffe et Cadima, 2016; Lee, 2018)

Tableau 6.2 Résultats des valeurs propres et du pourcentage de la variance pour chaque composante (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

Composantes	Valeur des vecteurs propres	% de la variance	% cumulatif
1	4,887	34,91	34,91
2	3,262	23,30	58,21
3	1,298	9,27	67,49
4	0,865	6,18	73,66
5	0,721	5,15	78,81
6	0,65	4,65	83,46
7	0,502	3,58	87,04
8	0,374	2,67	89,71
9	0,357	2,55	92,26
10	0,315	2,25	94,51
11	0,28	2,00	96,51
12	0,241	1,72	98,23
13	0,145	1,03	99,27
14	0,103	0,73	100,00

Afin de trancher, l'analyse des résultats pour 3 ou 4 composantes doit être effectuée. La présence d'un coefficient supérieur à 0,5 est généralement considérée comme acceptable pour conserver un indicateur dans une composante. (Brown, 2009) Le tableau 6.2 montre le résultat pour la rétention de 3 composantes à la suite d'une ACP avec une rotation varimax. Les indicateurs et leurs composantes associées sont de la même couleur.

Tableau 6.3 Résultats de l'ACP avec rotation varimax pour 3 composantes principales et 14 indicateurs (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

	Composante 1	Composante 2	Composante 3
% de ménages en location	0,881	0,267	0,100
% de ménages composés de personnes seules	0,852	-0,194	0,297
% de ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour le logement	0,811	0,214	0,162
% de la population dans des ménages à faible revenu	0,801	0,232	0,236
% du territoire situé dans un ilot de chaleur	0,796	0,103	-0,026
% de logements de taille inadéquate	0,324	0,772	-0,006
% de la population ignorant le français et l'anglais	0,207	0,738	0,116
% de ménages monoparentaux	0,003	0,638	-0,081
% de nouveaux immigrants (2011 à 2016)	0,486	0,600	-0,076
% de la population de 0 à 4 ans	-0,080	0,539	-0,525
% de la population de 5 à 9 ans	-0,433	0,502	-0,462
% de la population de 65 ans et plus	0,016	-0,261	0,888
% de la population inactive	0,140	0,013	0,815
Ratio de la population de 75 ans et plus/population de 65 ans et plus	0,204	0,190	0,669

Quelques éléments méritent d'être soulignés. D'abord, il est important de saisir qu'un coefficient élevé ne signifie pas que l'indicateur contribue plus fortement qu'un autre à la sensibilité réelle, cela exprime simplement que l'indicateur contribue fortement à la composante. Comme démontré à la sous-section 5.1.3, il n'existe pas de données précises qui permettent de déterminer la relation de cause à effet entre un indicateur et la mortalité ou la morbidité. Ainsi, il ne faut pas interpréter le tableau en considérant que les ménages en location sont plus sensibles que les ménages à faible revenu. Il faut plutôt comprendre que les ménages en location corréleront mieux avec le vecteur propre associé à la composante 1 et que les ménages à faible revenu possèdent également un lien avec cette réalité. Il est logique de croire que les locataires détiennent moins de ressources que les propriétaires et c'est ce qui est démontré avec ce tableau. Il en va de même pour la relation entre les personnes âgées de plus de 65 ans et la proportion de personnes inactives dans une communauté. La corrélation n'est pas parfaite, mais une forte tendance peut s'en dégager.

L'inconvénient avec ce modèle réside dans la coexistence de réalités différentes dans la composante 2. L'immigration récente et l'ignorance des langues officielles ne présentent pas les mêmes défis en termes d'adaptation que les ménages monoparentaux et la population jeune. De plus, la population âgée entre 0 et 9 ans possède un poids démographique 4 fois supérieur à l'immigration, ce qui vient fausser un peu l'interprétation de la composante.

Avant d'analyser en détail l'ACP avec 4 composantes, il est intéressant de regarder ce qui se produit lorsque l'on ajoute des composantes au-delà de ce qui est suggéré par les critères admis dans la littérature comme dans le tableau 6.4. L'introduction de la composante 5 isole un indicateur, soit celui du ratio de la population de 75 ans et plus/population de 65 ans et plus. Ce modèle ne dévoile aucune information supplémentaire et la notion de réduction des dimensions n'est pas respectée, puisque la composante 5 équivaut à un indicateur unique. Ainsi, il apparaît très clair que retenir 5 composantes est inadéquat pour ce jeu de données.

Tableau 6.4 Résultats de l'ACP avec rotation varimax pour 5 composantes principales et 14 indicateurs (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

	Composante 1	Composante 2	Composante 3	Composante 4	Composante 5
% de ménages en location	0,893	0,248	0,042	0,151	0,101
% de ménages composés de personnes seules	0,871	-0,074	0,255	-0,170	0,118
% de la population dans des ménages à faible revenu	0,815	0,240	0,283	0,173	-0,039
% de ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour le logement	0,788	0,301	0,099	-0,002	0,096
% du territoire situé dans un ilot de chaleur	0,760	0,222	-0,144	-0,132	0,127
% de la population ignorant le français et l'anglais	0,094	0,837	0,000	0,118	0,129
% de logements de taille inadéquate	0,237	0,802	-0,042	0,258	-0,017
% de nouveaux immigrants (2011 à 2016)	0,371	0,759	-0,136	0,025	-0,031
% de la population inactive	0,164	0,070	0,900	0,061	0,075
% de la population de 65 ans et plus	0,037	-0,147	0,769	-0,234	0,435
% de ménages monoparentaux	0,112	0,164	-0,014	0,856	-0,017
% de la population de 5 à 9 ans	-0,388	0,138	-0,463	0,574	-0,038
% de la population de 0 à 4 ans	-0,054	0,237	-0,568	0,503	-0,017
Ratio de la population de 75 ans et plus/population de 65 ans et plus	0,229	0,108	0,244	-0,007	0,909

Le tableau 6.5 montre le résultat pour 4 composantes. La division des indicateurs se fait plus naturellement avec cet arrangement.

Tableau 6.5 Résultats de l'ACP avec rotation varimax pour 4 composantes principales et 14 indicateurs (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

	Composante 1 (Ménages précaires)	Composante 2 (Personnes âgées ou inactives)	Composante 3 (Population immigrante récente)	Composante 4 (Ménages monoparentaux et population jeune)
% de ménages en location	0,892	0,099	0,252	0,146
% de ménages composés de personnes seules	0,866	0,280	-0,078	-0,189
% de la population dans des ménages à faible revenu	0,827	0,242	0,187	0,162
% de ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour le logement	0,788	0,142	0,299	-0,007
% du territoire situé dans un ilot de chaleur	0,751	-0,060	0,260	-0,131
% de la population de 65 ans et plus	0,026	0,874	-0,149	-0,263
% de la population inactive	0,181	0,827	-0,028	0,035
Ratio de la population de 75 ans et plus/population de 65 ans et plus	0,186	0,656	0,248	-0,023
% de la population ignorant le français et l'anglais	0,100	0,080	0,837	0,133
% de logements de taille inadéquate	0,250	-0,024	0,778	0,273
% de nouveaux immigrants (2011 à 2016)	0,380	-0,119	0,749	0,041
% de ménages monoparentaux	0,123	0,007	0,140	0,858
% de la population de 5 à 9 ans	-0,388	-0,408	0,171	0,593
% de la population de 0 à 4 ans	-0,058	-0,487	0,286	0,524

L'analyse du tableau 6.6 illustre la raison pour laquelle le vecteur propre de la composante 4 (ménages monoparentaux et population jeune) n'atteint pas la valeur de 1 dans le modèle proposé. En effet, le retrait de l'indicateur de la population entre 5 à 9 ans et des ménages de taille inadéquate rend l'indicateur de la population entre 0 à 4 ans non significatif pour toutes les composantes. Cela s'explique par une corrélation équivalente entre la population immigrante et les ménages monoparentaux. Cela est logique, car le taux de natalité est généralement plus élevé chez les immigrants que les Canadiens. Puisque le nuage de points représenté par la population jeune se retrouve à mi-chemin entre les vecteurs de la composante 3 et 4, aucun résultat statistiquement significatif n'en émerge. L'ajout de 2 indicateurs supplémentaires a permis de stabiliser les vecteurs propres et de produire des résultats statistiquement significatifs. Cependant, cela s'est fait au détriment d'une composante 4 moins forte sur le plan statistique. Cet exemple démontre bien que la relation entre les indicateurs choisis influence grandement le résultat.

Tableau 6.6 Résultats de l'ACP avec rotation varimax pour 4 composantes principales et 12 indicateurs (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

	Composante 1 (Ménages précaires)	Composante 2 (Personnes âgées ou inactives)	Composante 3 (Population immigrante récente)	Composante 4 (Ménages monoparentaux et population jeune)
% de ménages en location	0,899	0,071	0,202	0,178
% de ménages composés de personnes seules	0,866	0,301	-0,118	-0,139
% de la population dans des ménages à faible revenu	0,840	0,213	0,115	0,224
% de ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour le logement	0,809	0,131	0,257	0,025
% du territoire situé dans un ilot de chaleur	0,763	-0,051	0,241	-0,113
% de la population de 65 ans et plus	0,028	0,904	-0,112	-0,180
% de la population inactive	0,194	0,817	-0,056	0,153
% de la population de 75 ans et plus/population de 65 ans et plus	0,188	0,652	0,369	-0,055
% de la population ignorant le français et l'anglais	0,145	0,033	0,848	0,181
% de nouveaux immigrants (2011 à 2016)	0,438	-0,158	0,684	0,056
% de ménages monoparentaux	0,077	-0,095	0,149	0,921
% de la population de 0 à 4 ans	-0,066	-0,551	0,345	0,376

En toute transparence, des dizaines de tentatives ont été effectuées avant d'arriver au modèle proposé dans le tableau 6.5 qui a été retenu pour le calcul de la sensibilité et de la vulnérabilité dans cet essai. Bien que cela pourrait être associé à de la manipulation des données pour parvenir à un résultat précis, il faut se rappeler l'objectif de la démarche. Le but est de permettre aux décideurs d'obtenir le meilleur portrait possible de la situation qui prévaut sur leur territoire afin de faire des choix éclairés. Pour ce faire, les indicateurs et les composantes doivent détenir un sens dans le monde physique, sinon, les statistiques produites ne pourront pas bien se traduire en actions concrètes. Il ne faut pas voir le résultat de ce calcul comme une vérité absolue indiscutable, mais plutôt comme un outil qui estime la réalité sur le terrain avec toutes les limites décrites dans les différents chapitres de cet essai. Il aurait été plus simple de seulement présenter le résultat final, mais cela masquerait une partie importante de cet exercice. Une compréhension accrue de la relation entre les indicateurs et les composantes permet de tirer le maximum de cet outil. Afin de démontrer la mécanique qui articule la démarche, plusieurs scénarios et hypothèses sont explorés dans les prochaines sections.

6.1.2 Pondération et équation de la sensibilité

Le tableau 6.7 illustre le poids démographique de chaque indicateur à l'intérieur de la composante. La moyenne des indicateurs a été calculée, car leur addition n'aurait eu aucun sens. En effet, plusieurs ménages seuls sont probablement en location, donc ces deux indicateurs ne représentent pas 71,9 % des ménages de la première composante. Évidemment, cette moyenne est rudimentaire et possède une bonne marge d'incertitude. Cependant, en l'absence de données plus précises, cette estimation est adéquate pour offrir un ordre de grandeur.

Tableau 6.7 Poids démographique des indicateurs à l'intérieur de chaque composante (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

Composantes de la sensibilité	Indicateurs	Poids démographique à l'échelle de la province du Québec (%)	Moyenne (%)	Proportions
Ménages précaires	% de ménages en location	38,6	25,9	0,41
	% de ménages composés de personnes seules	33,3		
	% du territoire situé dans un ilot de chaleur	22,0		
	% de ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour le logement	21,0		
	% de la population dans des ménages à faible revenu	14,6		
Personnes âgées ou inactives	% de la population inactive	35,9	27,1	0,43
	% de la population de 65 ans et plus	18,3		
Population immigrante récente	% de nouveaux immigrants (2011 à 2016)	2,6	2,4	0,04
	% de la population ignorant le français et l'anglais	0,9		
	% de logements de taille inadéquate	3,8		
Ménages monoparentaux et population jeune	% de ménages monoparentaux	10,7	7,3	0,12
	% de la population de 5 à 9 ans	5,7		
	% de la population de 0 à 4 ans	5,4		
Total			62,7	1

À la lueur de ces chiffres, il apparaît évident que le poids démographique des composantes 3 et 4 est moins important que celui des composantes 1 et 2, nonobstant la marge d'erreur de ce calcul. Le choix de ne pas pondérer l'équation introduirait un biais dans l'analyse de la sensibilité. Par exemple, des mesures ciblées pour augmenter la capacité d'adaptation des immigrants récents ne diminueraient pas du quart la vulnérabilité, car ces derniers ne représentent même pas 3 % de la population.

Afin d'extraire un coefficient de correction, la proportion de chaque moyenne en fonction de la somme de l'ensemble des moyennes a été calculée. Ainsi, la somme des moyennes est de 62,7 et la moyenne des

indicateurs de la population immigrante est de 2,43, ce qui donne une proportion de 0,04 pour cette composante.

Le tableau 6.8 illustre le coefficient de correction qui sera utilisé pour chaque composante dans le calcul pondéré de la sensibilité.

Tableau 6.8 Coefficient de correction pour le calcul de la sensibilité

Composantes de la sensibilité	Coefficients	Proportions
Ménages précaires	1,25	0,417
Personnes âgées ou inactives	1,25	0,417
Population immigrante récente	0,125	0,041
Ménages monoparentaux et population jeune	0,375	0,125
Total	3	1

Par conséquent, les deux équations retenues pour effectuer les analyses sont expliquées au tableau 6.9.

Tableau 6.9 Équations de la sensibilité explorées dans le cadre de l'essai

Équation pondérée $S_t = 1,25 \times C_1 + 1,25 \times C_2 + 0,125 \times C_3 + 0,375 \times C_4$
Équation brute $S_t = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$
Variables S_t = Sensibilité totale C_1 = Ménages précaires C_2 = Personnes âgées ou inactives C_3 = Population immigrante récente C_4 = Ménages monoparentaux et la population jeune

La comparaison des deux approches permet de bien mesurer l'impact du choix de pondérer ou non et d'effectuer une décision finale éclairée en l'absence d'une littérature explicite sur le sujet.

6.1.3 Calcul du score Z et regroupement des données

Puisque la relation de cause à effet entre la mortalité et les indicateurs de sensibilité n'est pas bien définie, il est impossible de fixer des seuils absolus. Ainsi, la seule option viable est d'établir un score relatif à la moyenne pour observer quelles aires de diffusion présentent le plus de sensibilité en comparaison aux autres. Le score Z est une bonne méthode pour évaluer la distance d'un point par rapport à la moyenne selon l'écart-type. Cette méthode statistique présuppose une distribution normale des données. Bien que

les paramètres d'une distribution parfaitement normale soient connus (*skewness* = 0 et *kurtosis* = 3), le seuil à partir duquel une distribution ne peut plus être considérée comme normale n'est pas bien défini. Quelques tests avec diverses subtilités existent (Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, etc.), mais ces derniers sont sensibles à des échantillons qui comportent de nombreuses données comme c'est le cas pour cet essai. (Ghasemi et Zahediasl, 2012; Aguert et Capel, 2018) Néanmoins, suite aux transformations des données pour effectuer l'ACP, il est possible d'appliquer le théorème central limite qui stipule que la somme d'un grand nombre de variables aléatoires tend à se distribuer selon la loi normale. (Bro et Smilde, 2014; Kwak et Kim, 2017)

Un score Z a été calculé pour chaque composante à partir de la matrice de corrélation et de sa décomposition en valeurs singulières. (Lee, 2018) Par la suite, afin de pouvoir comparer les composantes entre elles sur une même échelle, une normalisation de type Min-Max a été appliquée sur le score Z résultant. Les équations détaillées se retrouvent à l'annexe 1. (Jayalakshmi et Santhakumaran, 2011) Enfin, le regroupement des données pour établir les seuils de chaque composante a été effectué à l'aide de la méthode du *Jenks Natural Breaks*.

Le score total de la sensibilité a été déterminé pour chaque aire de diffusion selon les équations décrites à la sous-section 6.1.2. Le regroupement des données a également été réalisé à l'aide du *Jenks Natural Breaks*. Cependant, bien que cette méthode permette d'optimiser les seuils, elle requiert tout de même de choisir le nombre de classes manuellement. Pour ce faire, un test existe, celui du *goodness of variance fit* (GVF), qui consiste à établir la variance en fonction des différents nombres de classes dans un graphique, puis de sélectionner le nombre de classes où l'on peut apercevoir un coude dans la courbe. (Smith, 1986) L'équation de ce test se retrouve à l'annexe 1 et la figure 6.1 illustre sa représentation graphique.

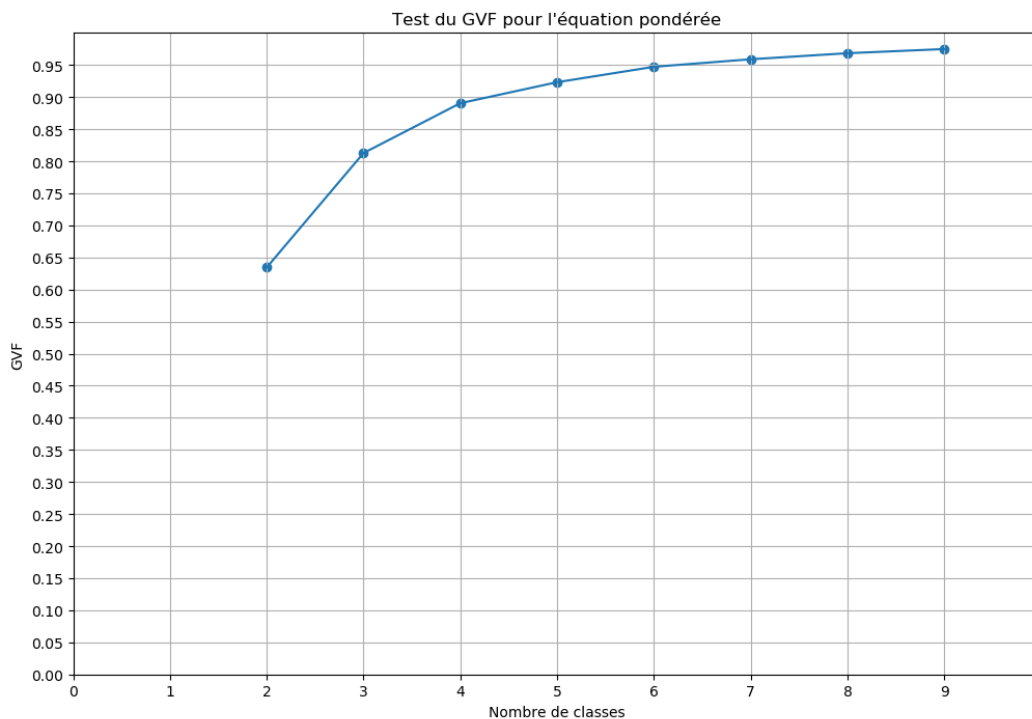


Figure 6.1 Test du *goodness of variance fit* pour l'équation pondérée de sensibilité (produit avec : Python, 2020)

Bien que subjectif, il est possible d'observer un plateau se former à partir de cinq classes indiquant que l'ajout de classes supplémentaires n'apporterait pas beaucoup d'informations additionnelles. Au contraire, la rétention de deux ou trois classes serait nettement insuffisante. Une zone grise existe pour le choix de quatre classes, puisque l'écart n'est pas énorme avec cinq classes. Cependant, vu que l'Atlas de la vulnérabilité utilise des quintiles (donc cinq classes), il sera plus facile de comparer en conservant cinq classes. Afin d'illustrer la différence entre la méthode du *Jenks Natural Breaks* et les quintiles, le tableau 6.10 et la figure 6.2 montrent la distribution des données, ainsi que les intervalles selon les deux approches pour l'équation pondérée de sensibilité.

Tableau 6.10 Comparaison entre le *Jenks Natural Breaks* et la méthode des quintiles sous forme numérique pour l'équation pondérée de sensibilité (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

Jenks Natural Breaks						
Niveau de sensibilité	Sensibilité très faible	Sensibilité faible	Sensibilité moyenne	Sensibilité forte	Sensibilité très forte	Total
[Intervalles des scores] (Écart)	[0,54 - 0,90] (0,36)	[0,90 - 1,07] (0,17)	[1,07 - 1,25] (0,18)	[1,25 - 1,49] (0,24)	[1,49 - 2,18] (0,69)	[0,54 - 2,18] (1,64)
Nombre de données	2 544	3 751	3 559	2 439	815	13 108
Quintiles						
Niveau de sensibilité	Sensibilité très faible	Sensibilité faible	Sensibilité moyenne	Sensibilité forte	Sensibilité très forte	Total
[Intervalles des scores] (Écart)	[0,54 - 0,92] (0,38)	[0,92 - 1,05] (0,13)	[1,05 - 1,17] (0,12)	[1,17 - 1,31] (0,14)	[1,31 - 2,18] (0,87)	[0,54 - 2,18] (1,64)
Nombre de données	2 727	2 692	2 487	2 616	2 586	13 108

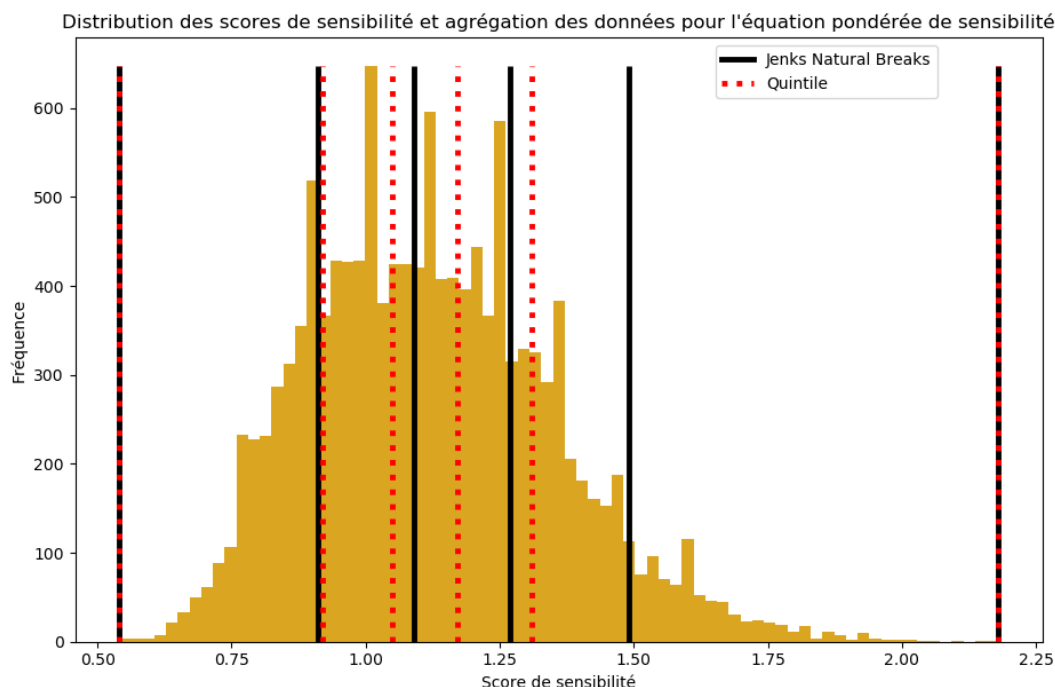


Figure 6.2 Histogramme de la distribution des scores et comparaison entre le *Jenks Natural Breaks* et la méthode des quintiles pour l'équation pondérée de sensibilité (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

Le même phénomène se produit avec l'équation brute dans le tableau 6.11 et la figure 6.3, ce qui démontre que le choix de la pondération n'a que peu d'impacts sur le résultat en comparaison à la sélection de la méthode de regroupement des données.

Tableau 6.11 Comparaison entre le *Jenks Natural Breaks* et la méthode des quintiles sous forme numérique pour l'équation brute de sensibilité (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

Jenks Natural Breaks						
Niveau de sensibilité	Sensibilité très faible	Sensibilité faible	Sensibilité moyenne	Sensibilité forte	Sensibilité très forte	Total
[Intervalles des scores] (Écart)	[0,76 - 1,12] (0,36)	[1,12 - 1,28] (0,16)	[1,28 - 1,46] (0,18)	[1,46 - 1,67] (0,21)	[1,67 - 2,36] (0,69)	[0,76 - 2,36] (1,6)
Nombre de données	2 790	4 050	3 181	2 126	961	13 108
Quintiles						
Niveau de sensibilité	Sensibilité très faible	Sensibilité faible	Sensibilité moyenne	Sensibilité forte	Sensibilité très forte	Total
[Intervalles des scores] (Écart)	[0,76 - 1,12] (0,36)	[1,12 - 1,22] (0,10)	[1,22 - 1,33] (0,11)	[1,33 - 1,49] (0,16)	[1,49 - 2,36] (0,87)	[0,76 - 2,36] (1,6)
Nombre de données	2 790	2 565	2 540	2 689	2 524	13 108

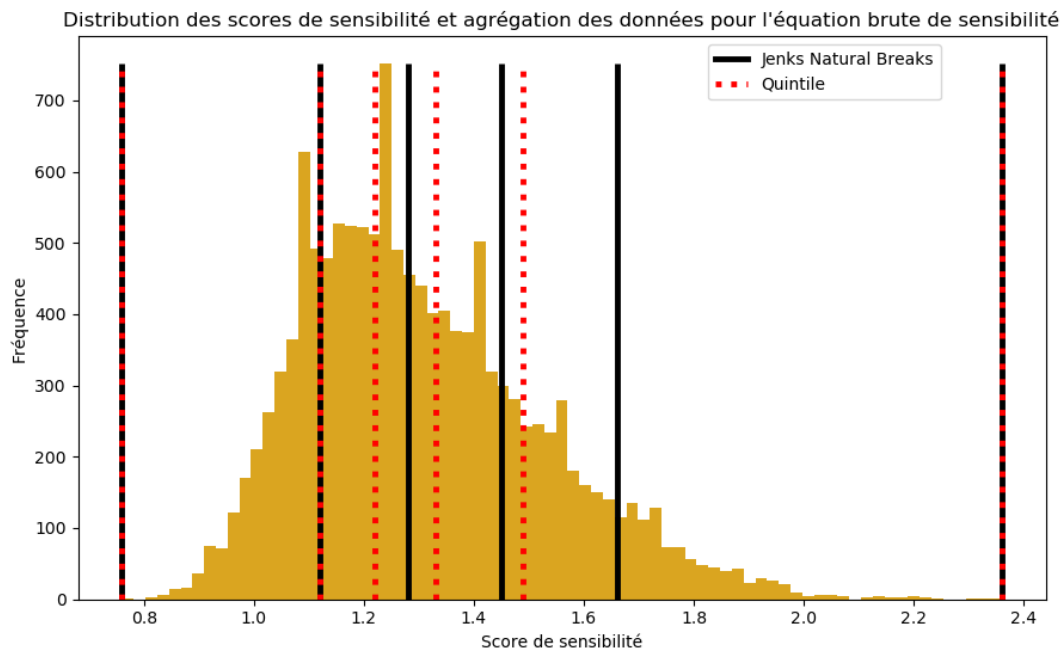


Figure 6.3 Histogramme de la distribution des scores et comparaison entre le *Jenks Natural Breaks* et la méthode des quintiles pour l'équation brute de sensibilité (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

La sensibilité très faible varie peu d'une méthode à l'autre, mais une différence significative se remarque pour la sensibilité très forte. Ceci est peu surprenant, car les quintiles déterminent à l'avance que 20 % des scores seront très sensibles, ce qui n'est pas forcément le cas. La distribution légèrement asymétrique des scores pondérés et bruts (*skewness* de 0,47 et de 0,70 respectivement) explique pourquoi l'écart des

intervalles n'est pas bien distribué avec la méthode des quintiles. La méthode du *Jenks Natural Breaks* permet d'atténuer cet effet.

6.2 Présentation des couches générées dans QGIS

Les résultats cartographiques de cet essai ont tous été produits à l'aide de QGIS. L'objectif de cette sous-section n'est pas d'expliquer en profondeur toutes les possibilités de la géomatique et les manipulations effectuées lors de ce travail, mais de simplement souligner l'immense potentiel d'aide à la décision que constitue cette approche.

Les données du recensement ont été transformées et analysées au préalable avec un algorithme codé en Python, puis ont été exportées dans QGIS en format *comma-separated values* (CSV). En tout, cinq couches ont été créées à partir des données vectorielles des aires de diffusion fournies par Statistique Canada. Les quatre premières représentent une composante principale, alors que la cinquième illustre le score final de la sensibilité. L'avantage de ce découpage réside dans les informations détaillées contenues dans chaque couche. La sélection des aires de diffusion d'intérêt permet d'explorer les pourcentages qui ont servi à effectuer l'ACP, en plus des valeurs absolues qui leur sont associées. Cette stratégie simplifie la compréhension des décideurs afin de bien cibler les raisons pour lesquelles un niveau de sensibilité a été attribué à chaque région. Ainsi, si un quartier possède une forte composante d'immigration avec une population jeune, l'approche communautaire sera différente que pour un voisinage avec un important contingent de personnes âgées.

Des filtres facilitent la personnalisation des analyses grâce à la sélection des paramètres désirés (par ville, par aire de diffusion, etc.). De plus, il est possible de joindre des couches supplémentaires pour ajouter de l'information, comme celle des infrastructures critiques. Les captures d'écran pour illustrer le résultat final se retrouvent à l'annexe 2.

6.3 Comparaison entre différentes méthodes de calcul de la sensibilité et l'Atlas de la vulnérabilité

Puisque beaucoup de zones grises existent dans la littérature, il semble pertinent d'explorer en profondeur différentes avenues pour essayer de dégager la meilleure méthode en fonction des données recueillies. Le tableau 6.12 illustre quatre villes aux réalités différentes choisies pour évaluer la validité des résultats. Il est important de vérifier si le calcul permet de détecter la sensibilité autant dans une petite municipalité que dans une métropole.

Tableau 6.12 Population et nombre de ménages pour la province de Québec, l'île de Montréal, la Ville de Sherbrooke, la Ville de Magog et la Ville d'Asbestos (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

	Province du Québec	Île de Montréal	Sherbrooke	Magog	Asbestos
Population	8 164 361	1 942 717	161 323	26 669	6 786
Nombre de ménages	3 531 665	870 450	73 485	12 280	3 220

Certaines données ressortent de l'analyse de la moyenne des scores Z pour chaque composante dans le tableau 6.13. L'île de Montréal et la Ville de Sherbrooke présentent un haut niveau de ménages précaires, alors que les villes de Magog et d'Asbestos abritent un nombre important de personnes âgées ou inactives. La population immigrante récente est nettement inférieure pour ces deux dernières également.

Tableau 6.13 Scores Z moyen des aires de diffusion de la province de Québec, l'île de Montréal, la Ville de Sherbrooke, la Ville de Magog et la Ville d'Asbestos (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

Composantes de la sensibilité	Scores Z moyen des aires de diffusion				
	Province du Québec	Île de Montréal	Sherbrooke	Magog	Asbestos
Ménages précaires	0,431	0,512	0,502	0,442	0,455
Population âgée ou inactive	0,353	0,339	0,351	0,414	0,490
Population immigrante récente	0,211	0,297	0,188	0,155	0,148
Ménages monoparentaux et population jeune	0,312	0,311	0,301	0,314	0,339
Total brute	1,308	1,459	1,343	1,325	1,433
Total pondéré	1,124	1,218	1,204	1,207	1,328

Chaque composante qui détermine le score Z est détaillée dans le tableau 6.14. Une bonne corrélation existe entre les scores finaux et le poids démographique de chaque indicateur. Ainsi, l'île de Montréal possède un fort taux de ménages en location et d'immigrants récents, mais présente un profil démographique plus jeune et plus actif que les villes de Magog et d'Asbestos. La Ville de Sherbrooke se situe à mi-chemin entre ces deux réalités.

Tableau 6.14 Poids démographique des 4 composantes de la sensibilité pour la province de Québec, l'île de Montréal, la Ville de Sherbrooke, la Ville de Magog et la Ville d'Asbestos (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

Composantes de la sensibilité	Indicateurs	Poids démographique (%)				
		Province du Québec	Île de Montréal	Sherbrooke	Magog	Asbestos
Ménages précaires	% de ménages en location	38,6	60,0	48,5	38,2	41,1
	% de ménages composés de personnes seules	33,3	39,4	37,9	35,6	39,8
	% du territoire situé dans un ilot de chaleur	22	43,2	32,1	13,8	18,3
	% de ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour le logement	21	30,0	22,5	19,8	20,8
	% de la population dans des ménages à faible revenu	14,6	21,2	18,0	15,7	22,5
Personnes âgées ou inactives	% de la population inactive	35,9	36,1	37,0	41,4	53,9
	% de la population de 65 ans et plus	18,3	16,6	18,7	26,6	31,4
	% de la population de 75 ans et plus/65 ans et plus	42,4	48,2	43,5	40,6	45,5
Population immigrante récente	% de nouveaux immigrants (2011 à 2016)	2,6	7,1	2,4	0,2	0,3
	% de la population ignorant le français et l'anglais	0,9	2,3	0,7	0,0	0,0
	% de logements de taille inadéquate	3,8	8,2	2,3	1,6	1,2
Ménages monoparentaux et population jeune	% de ménages monoparentaux	10,7	11,5	9,9	9,9	9,5
	% de la population de 5 à 9 ans	5,7	5,4	5,4	5,0	5,3
	% de la population de 0 à 4 ans	5,4	5,7	5,6	4,2	4,4

Le tableau 6.15 souligne les indicateurs et les composantes de la sensibilité retenus par l'équipe de chercheurs de l'Université Laval derrière la production de l'Atlas de la vulnérabilité. Parmi les éléments divergents avec le modèle proposé dans cet essai, il est possible de noter l'utilisation des indicateurs d'âges sensibles plutôt qu'une séparation des jeunes et des aînés, de scolarité, de l'âge des bâtiments, du nombre d'étages et de la proportion de logements nécessitant des réparations majeures. Chaque élément est justifié par des données probantes qui proviennent de la littérature. Par exemple, les gens au dernier étage de bâtiments de cinq étages et plus sont davantage exposés à la chaleur à cause du rayonnement solaire et de l'accumulation d'air chaud ascendant. L'année 1980 a été établie en fonction de l'introduction de normes d'efficacité énergétique au code du bâtiment. (Barrette et al., 2018a) Cependant, une revue de littérature n'a pas démontré la relation entre l'enveloppe thermique d'un immeuble et l'augmentation de

la mortalité. Les auteurs soulignent toutefois la nécessité d'étudier la question plus en profondeur à cause du manque de données disponibles, ce qui ne permet pas de tirer des conclusions définitives. (Eisenman et al., 2016)

Le regroupement des données pour l'Atlas de la vulnérabilité se fait à l'aide de quintiles et se base sur les travaux de Pampalon et Raymond (2003), ainsi que sur ceux de Almeida, Welle et Birkmann (2016). Par contre, certaines études suggèrent de ne pas utiliser cette méthode, puisqu'elle ne prend pas en compte la distribution des données comme démontré à la section 4.4. (Mazari, Tirado, Nazarian et Aldouri, 2017; Calka, 2018)

Ainsi, en l'absence d'une littérature claire, il est ardu de trancher en faveur d'un modèle ou d'un autre. Néanmoins, il est intéressant d'observer l'influence de ces choix sur le résultat final du calcul de la sensibilité.

Tableau 6.15 Indicateurs et composantes de la sensibilité utilisés par les chercheurs de l'Atlas de la vulnérabilité
(tiré de : Barrette et al., 2018a)

Composantes	Indicateurs de la sensibilité
Composante 1	Fréquence du faible revenu en 2015 fondé sur la mesure de faible revenu après impôt
	Proportion de personnes n'ayant aucun certificat, diplôme ou grade
	Proportion de personnes vivant seules
	Proportion de familles monoparentales
	Proportion de logements loués
	Proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation
	Proportion de logements dans l'aire de diffusion dans un îlot de chaleur
Composante 2	Proportion de personnes immigrantes récentes
	Proportion de personnes ne connaissant pas une langue officielle
Composante 3	Proportion de logements nécessitant des réparations majeures
	Proportion de logements construits avant 1980
Composante 4	Proportion de résidences avec 5 étages ou plus
	Proportion de personnes d'âge sensible (65 ans et +; 4 ans et moins)

Les résultats de cinq méthodes différentes de calcul sont illustrés dans les figures 6.4 à 6.7. Puisque l'analyse de toutes les aires de diffusion des villes sélectionnées nécessiterait trop de pages, seuls quelques quartiers ont été retenus. Les données démographiques de ces derniers accompagnent les cartes produites dans QGIS. L'habillage des cartes ne respecte pas toutes les conventions (absence de la rose des vents, etc.), car ces éléments surchargeaient la figure et complexifiaient la comparaison entre les diverses approches. L'échelle utilisée est de 1 : 12 550.

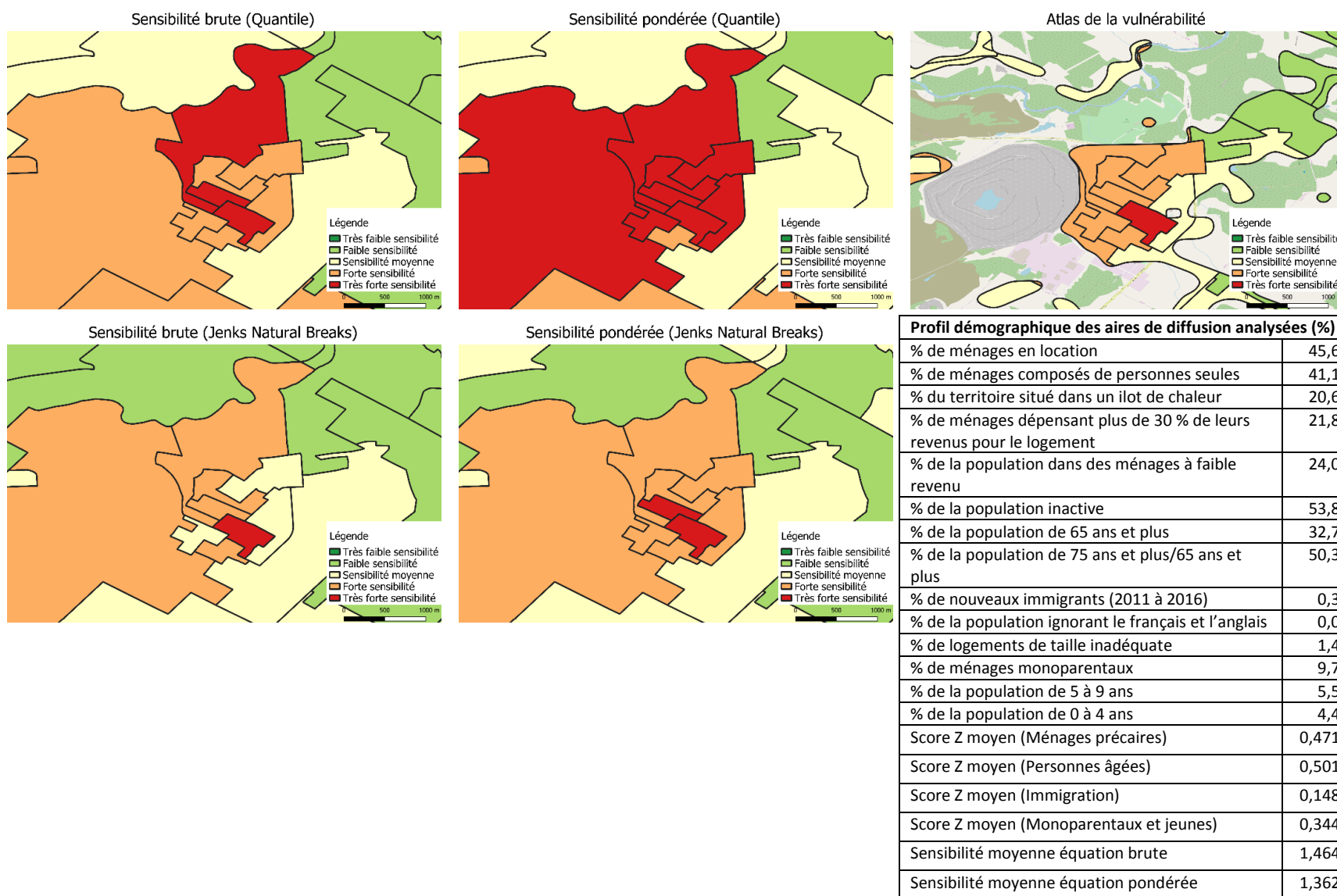


Figure 6.4 Cartographie de la sensibilité pour la Ville d'Asbestos selon cinq méthodes différentes (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b; QGIS, 2019; OSM, 2020; Barrette et al., 2020)

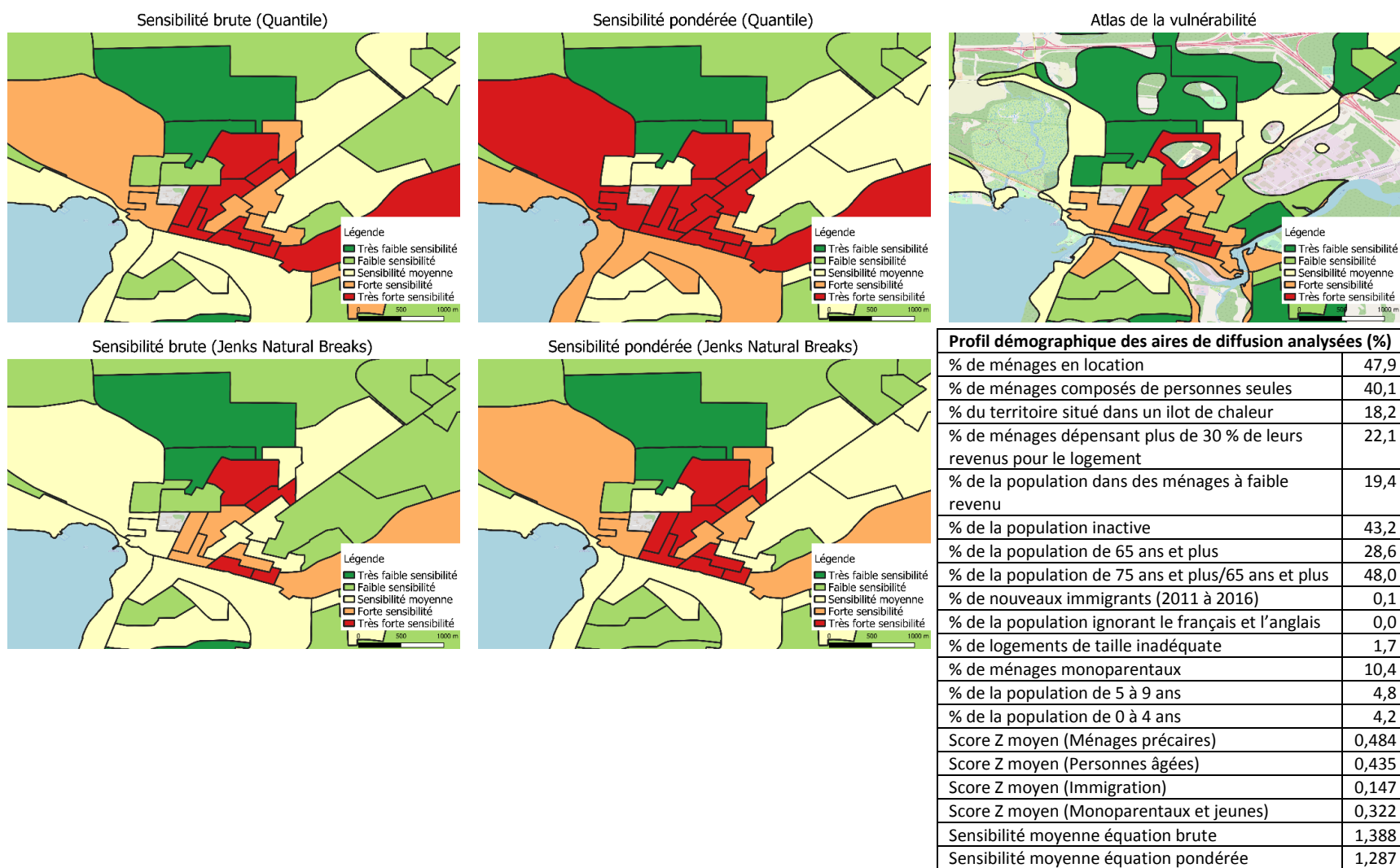


Figure 6.5 Cartographie de la sensibilité pour la Ville de Magog selon cinq méthodes différentes (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b; QGIS, 2019; OSM, 2020; Barrette et al., 2020)

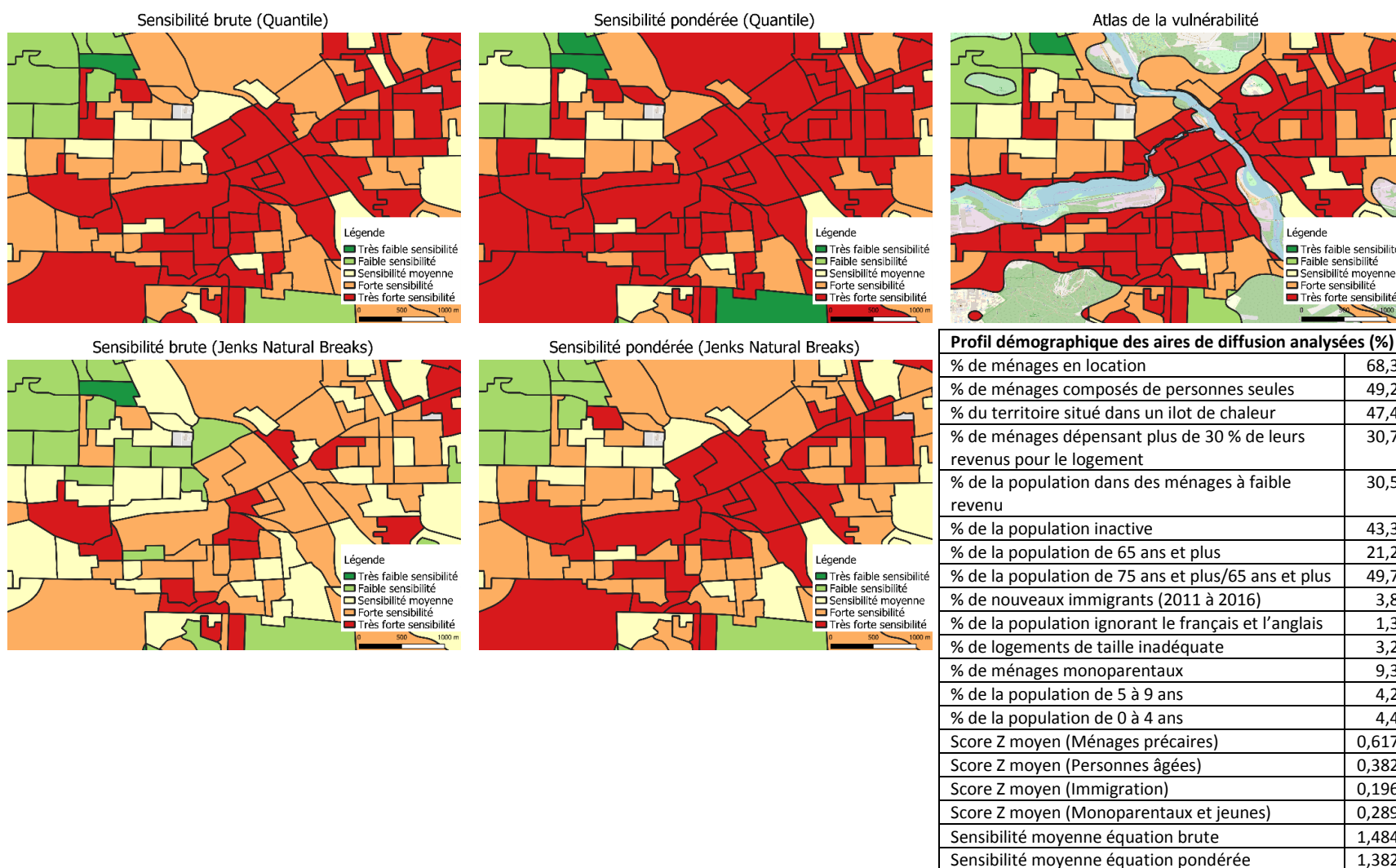


Figure 6.6 Cartographie de la sensibilité pour la Ville de Sherbrooke selon cinq méthodes différentes (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b; QGIS, 2019; OSM, 2020; Barrette et al., 2020)



Figure 6.7 Cartographie de la sensibilité pour l'île de Montréal selon cinq méthodes différentes (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b; QGIS, 2019; OSM, 2020; Barrette et al., 2020)

Quelques tendances semblent se dégager de ces quatre cas. La dimension de la ville n'affecte pas la capacité des modèles à faire ressortir la sensibilité. Ces calculs ne sont pas uniquement valables que pour les petites ou les grosses municipalités. Le degré de discordance entre les méthodes se résume habituellement à un seul échelon (sensibilité forte plutôt que très forte ou moyenne plutôt que forte). Ainsi, chaque modèle brosse un portrait global de la situation en accord avec les données démographiques disponibles.

Il est évidemment impossible de généraliser à partir de quelques exemples. Ces derniers servaient simplement à conceptualiser les différentes techniques. Avant de tirer des conclusions, il faut regarder les données d'ensemble. Le tableau 6.16 illustre la distribution des aires de diffusion selon le niveau de sensibilité pour la province du Québec.

Tableau 6.16 Distribution des niveaux de sensibilité par aires de diffusion selon la méthode de calcul (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b; Barrette et al., 2020)

Méthodes	Niveaux de sensibilité				
	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Brute (Quantile)	2 790	2 565	2 540	2 689	2 524
Pondérée (Quantile)	2 727	2 692	2 487	2 616	2 586
Atlas de la vulnérabilité (Quantile)	2 756	2 749	2 709	2 536	2 370
Brute (Jenks)	2 790	4 050	3 181	2 126	961
Pondérée (Jenks)	2 544	3 751	3 559	2 439	815

Sans surprise, la pondération ou le choix des indicateurs ne possèdent pas un impact significatif sur la distribution des niveaux de sensibilité en comparaison à la méthode de regroupement des données, puisque les quintiles déterminent à l'avance la grosseur des classes. Pour ce qui est de la pondération, malgré l'atténuation de deux composantes, elle permet de faire ressortir une plus grande sensibilité que l'équation brute (3 254 vs 3 087 pour la sensibilité forte et très forte combinée). Cela s'explique par le fait que les immigrants récents et les ménages monoparentaux corrélaient bien avec les ménages précaires comme démontré par les diverses ACP présentées à la sous-section 6.1.1 et le modèle de l'Atlas de la vulnérabilité. Ainsi, en dépit d'un poids plus faible, ils demeurent bien représentés dans les aires de diffusion à très grande sensibilité. Les deux composantes ne sont pas futiles pour autant, puisqu'elles ajoutent un niveau de précision sur la situation qui prévaut sur le terrain.

Malgré toutes ces considérations, l'essentiel est de pouvoir détecter la sensibilité dans le monde réel, c'est-à-dire avoir un potentiel prédictif pour la mortalité et la morbidité. Une étude du centre intégré de santé et de services sociaux de Laval a démontré que les décès de la vague de chaleur de 2018 toutes

causes confondues se produisaient 1,5 fois plus souvent dans les zones de fortes vulnérabilités que dans celles de moindre vulnérabilité en se basant sur les données de l'Atlas de la vulnérabilité. Cependant, de nombreuses limites sont soulignées par les auteurs. Aucune confirmation de cause de décès attribuable à la chaleur n'a été répertoriée et seulement 12 décès sont soupçonnés d'être liés à la chaleur. Une absence de consensus au niveau de la définition d'une mort par la chaleur explique en partie ce manque de données. Le petit nombre de cas n'offre pas une grande puissance statistique pour tirer des conclusions définitives. (Centre intégré de santé et de services sociaux de Laval, 2019)

De plus, certains concepts de base en épidémiologie ne sont pas considérés. La sensibilité, qui se traduit par la détection des cas avérés (vrai positif), et la spécificité, qui se définit par la capacité à rejeter les cas non reliés (vrai négatif), ne peuvent pas être calculées avec le peu de données disponibles. En effet, si l'on prend un cas extrême où 90 % des zones sont classées comme très sensibles, il est évident que la majorité des décès aura lieu dans des zones sensibles par rapport à celles non sensibles. Par contre, la plupart de ces décès ne seront pas liés à la sensibilité à la chaleur, ce qui s'avérerait de faux positifs. (Zhu, Zeng et Wang, 2010) Un seuil de sensibilité trop bas pourrait engendrer des coûts inutiles pour l'adaptation, ce qui n'est pas souhaitable. Il faut ainsi s'assurer de définir les paramètres qui permettent de détecter un maximum de cas reliés à la chaleur, tout en diminuant la quantité de gens dans le bassin de la population vulnérable. Cet équilibre est très difficile à trouver et ne pourra pas être étudié avec le peu de ressources disponibles pour écrire cet essai.

Par conséquent, en l'absence de suffisamment de données pour sélectionner un modèle probant, les décideurs doivent effectuer un choix subjectif. La méthode choisie pour le reste des analyses dans les prochaines sections est l'équation pondérée avec le *Jenks Natural Breaks*. Cette dernière semble éviter de surreprésenter la sensibilité (donc de générer de faux positifs) tout en tenant compte du poids démographique de chaque composante. Cependant, cette équation doit être considérée comme un point de départ pour approfondir la recherche, et non comme une solution définitive.

6.4 Comparaison avec l'Atlas de la vulnérabilité pour le calcul de la capacité d'adaptation et de la vulnérabilité

Comme souligné à la section 5.1.3, les stratégies d'adaptation sont difficilement quantifiables, ce qui rend problématique leur intégration dans une équation. Néanmoins, quelques tentatives ont été effectuées dans la littérature.

L'étude de cas sur la sensibilité sociétale et territoriale aux inondations pour la Ville de Montréal de Thomas et al., (2012) a utilisé l'outil *lAdapt* qui propose des critères qui augmentent la capacité d'adaptation. Cependant, plusieurs critères expriment l'inverse de la sensibilité. Par exemple, la connaissance d'une langue officielle ou la possession d'un diplôme représentaient des indicateurs d'adaptation, alors qu'ignorer les langues officielles et ne pas avoir de diplôme se révélaient être des indicateurs de sensibilité. Cette approche possède le désavantage de pondérer deux fois un même élément et n'ajoute pas d'informations au modèle si la capacité d'adaptation est soustraite à la sensibilité pour donner un score de vulnérabilité. De plus, dans le cadre de cette étude, les infrastructures critiques telles que les hôpitaux étaient jugées comme des points de sensibilité territoriale, puisqu'elles abritent une population hautement sensible aux aléas.

Les chercheurs de l'Atlas de la vulnérabilité ont adopté le raisonnement inverse. Ces derniers considèrent plutôt les hôpitaux comme des indicateurs qui permettent de faire face aux aléas, puisqu'un patient a plus de chance d'obtenir des soins rapidement si des infrastructures médicales sont à proximité. La capacité d'adaptation n'a pas été calculée, car le but du projet était de cartographier l'état actuel de la vulnérabilité, et non de se projeter dans le temps. Le tableau 6.17 résume les indicateurs retenus par l'équipe de l'Université Laval. (Barrette et al., 2018a)

Tableau 6.17 Indicateurs retenus par l'équipe de chercheurs de l'Atlas de la vulnérabilité pour la capacité à faire face (tiré de : Barrette et al., 2018a)

Indicateurs de la capacité à faire face
Accessibilité aux services de type pompier
Accessibilité aux services de santé (CLSC et CHSGS)
Accessibilité aux piscines publiques
Accessibilité aux services de type policier
Accessibilité aux pharmacies
Accessibilité aux CLSC
Accessibilité aux CHSGS

Ainsi, bien que l'évaluation de l'état actuel des choses soit pertinente, celle-ci ne permet pas de bien saisir l'impact des diverses mesures d'adaptation sur la sensibilité. L'indice *lAdapt* ne sera pas retenu, car il n'est pas en lien direct avec les stratégies d'adaptation et ne se différencie pas suffisamment de la sensibilité. De plus, les hôpitaux ne seront pas considérés comme des infrastructures sensibles, puisqu'en théorie, ces derniers sont censés être organisés pour déployer une résilience supérieure à la moyenne face aux aléas. Si ce n'est pas le cas, ce sont les gestionnaires hospitaliers qui doivent revoir leurs procédures à une

échelle plus microscopique. Le plan d'adaptation de cet essai vise plutôt l'aménagement des ressources à un niveau macroscopique.

Puisque l'absence de littérature empêche de quantifier adéquatement les mesures d'adaptation identifiées à la sous-section 5.1.3, une équation a été conçue par l'auteur de cet essai afin d'éclairer les décideurs sur les éléments importants à considérer avant d'implanter ces stratégies. Celle-ci est détaillée au tableau 6.18.

Tableau 6.18 Équation retenue pour la capacité d'adaptation

<p>Équation</p> $CA = \sum_{x=1}^n Zscore_{cx} \times PIndicateur_{cx} \times Efficacité_{cx} \times Pondération_{cx} \times 2,18$
<p>Variables</p> <p><i>CA</i> = Capacité d'adaptation <i>Zscore_{cx}</i> = Score Z de la composante à laquelle s'applique la mesure d'adaptation (de 1 à n composante) <i>PIndicateur_{cx}</i> = Poids de l'indicateur à l'intérieur de la composante étudiée <i>Efficacité_{cx}</i> = Efficacité de la mesure en pourcentage <i>Pondération_{cx}</i> = Pondération de la composante dans l'équation de sensibilité 2,18 = Constante équivalant à la valeur maximale de l'équation de sensibilité</p>

Afin d'expliquer le rôle de chaque variable, deux exemples concrets seront illustrés à partir des données provenant de la Ville de Magog qui sont représentées au tableau 6.19.

Tableau 6.19 Score Z de chaque composante et poids démographique de chaque indicateur pour la Ville de Magog
(compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b)

Composantes de la sensibilité	Scores Z	Indicateurs	Poids démographique (%)
Ménages précaires	0,442	% de ménages en location	38,2
		% de ménages composés de personnes seules	35,6
		% du territoire situé dans un îlot de chaleur	13,8
		% de ménages dépensant plus de 30 % de leurs revenus pour le logement	19,8
		% de la population dans des ménages à faible revenu	15,7
Personnes âgées ou inactives	0,414	% de la population inactive	41,4
		% de la population de 65 ans et plus	26,6
		% de la population de 75 ans et plus/65 ans et plus	40,6
Population immigrante récente	0,155	% de nouveaux immigrants (2011 à 2016)	0,2
		% de la population ignorant le français et l'anglais	0,0
		% de logements de taille inadéquate	1,6
Ménages monoparentaux et population jeune	0,314	% de ménages monoparentaux	9,9
		% de la population de 5 à 9 ans	5,0
		% de la population de 0 à 4 ans	4,2
Total	1,207		

Une mesure qui revient souvent dans les plans d'adaptation est l'implantation de jeux d'eau. (Ville de Sherbrooke, 2013; Ville de Trois-Rivières, 2013; Ville de Montréal, 2015; Ville de Laval, 2016) Cependant, cette mesure ne repose sur aucune littérature solide pour démontrer son utilité en cas de chaleur extrême. De plus, l'effet d'une simple douche froide serait protecteur chez les personnes âgées selon une étude réalisée en France, ce qui rend la pertinence d'investir dans cette mesure discutable. (Vandentorren et al, 2006) Au-delà de l'efficacité, il y a aussi l'aspect de la population visée. Les personnes âgées à mobilité réduite ne pourraient pas bénéficier de jeux d'eau, tout comme celles vivant loin et n'ayant pas accès à une voiture ou au transport public. On comprend rapidement que cette stratégie ne pourrait pas contribuer significativement à la capacité d'adaptation globale. Ceci pourrait se mesurer grâce à l'équation proposée.

Dans un premier temps, la population âgée ne profiterait pas de cette approche, alors seuls les scores Z des composantes 1, 2 et 3 seront considérés.

Deuxièmement, il faut choisir le ou les indicateurs à l'intérieur de chaque composante qui seront impactés par la mesure. Pour la composante 1, l'indicateur ménage en location est celui qui a le plus grand potentiel d'être affecté. Plusieurs personnes âgées qui ne bénéficient pas de la stratégie sont probablement en location, mais il faut garder en tête que cela constitue une estimation très rudimentaire pour simplement

faire réfléchir les décideurs sur l'impact de leurs actions. L'ajout d'un autre indicateur comme les ménages à faible revenu n'aurait pas de sens, car cela reviendrait à additionner deux fois les mêmes personnes. Ainsi, le poids de l'indicateur dans la composante représente 1/5. Pour ce qui est de la composante 3, on peut présumer que les jeunes et les parents peuvent profiter de la mesure, donc le poids sera de 3/3. En ce qui concerne l'immigration, on peut conserver les nouveaux immigrants comme indicateur, ce qui donne un poids de 1/3.

Troisièmement, il faudrait évaluer le bénéfice de la mesure. Ceci demande un suivi étroit de la part des décideurs. Des statistiques sur l'utilisation devront être produites, car si les jeux d'eau ne sont pas fréquentés, son efficacité est forcément de 0 %. Il pourrait être raisonnable de croire que 5 % de la population visée se servirait des jeux d'eau, donc son efficacité maximale serait de 5 %. Avec le temps, il serait intéressant de mesurer si des impacts sont remarqués sur les indicateurs de suivi identifiés à la sous-section 5.1.4, comme les visites à l'urgence et la mortalité. En l'absence de ce type de données, une estimation approximative de la fréquentation sera la seule mesure disponible.

Quatrièmement, la pondération de l'équation de sensibilité tiendra compte de la proportion approximative de chaque composante dans la population. Ainsi, un coefficient de 1,25, 0,125 et 0,375 sera appliqué aux composantes 1, 3 et 4 respectivement.

Enfin, il faut ramener le score en fonction de la valeur maximale obtenue dans le calcul de la sensibilité. En effet, il est impossible pour la capacité d'adaptation de dépasser le seuil de la sensibilité d'un point de vue conceptuel. En fait, la capacité d'adaptation est généralement beaucoup moins importante que la sensibilité. (Barrette et al., 2018a) Les multiples variables qui atténuent le score de cette équation suivent ce principe.

Le résultat chiffré de cette stratégie d'adaptation serait donc :

$$CA = \sum_{x=1}^4 Zscore_{cx} \times PIndicateur_{cx} \times Efficacité_{cx} \times Pondération_{cx} \times 2,18$$

$$CA = (0,442 \times \frac{1}{5} \times 5 \% \times 1,25 \times 2,18) + (0,155 \times \frac{1}{3} \times 5 \% \times 0,125 \times 2,18) + (0,314 \times \frac{3}{3} \times 5 \% \times 0,375 \times 2,18)$$

$$CA = 0,0256$$

Ainsi, la vulnérabilité pour la Ville de Magog avec cette stratégie serait de :

$$V = S - CA$$

$$V = 1,207 - 0,0256$$

$$V = 1,18$$

L'impact de cette mesure est minime et ne suffirait pas pour faire basculer la sensibilité dans une classe plus faible. La tenue d'un registre de personnes vulnérables est souvent évoquée pour atténuer la sensibilité et semble avoir un effet positif avéré dans la littérature, comme décrit à la sous-section 5.1.3. (Warren et Lemmen, 2014; ANSP, 2017; Casanueva et al., 2019)

En suivant une procédure similaire à celle des jeux d'eau, il serait possible de déterminer que cette stratégie profite à tous et s'applique aux quatre composantes. L'efficacité de cette approche pour diminuer la mortalité est difficile à évaluer, mais la France a réussi à passer de 15 000 à 700 décès en une décennie grâce à un bouquet de mesures. (ANSP, 2017) Ainsi, même si on ne peut pas calculer directement l'impact du registre, il peut être raisonnable d'utiliser un pourcentage d'efficacité d'environ 25 % multiplié par la quantité de citoyens sensibles inscrits au registre. La géomatique permet d'estimer ce nombre par secteur. Par conséquent, si l'on rejoint 80 % de la population, cela conférerait une efficacité totale de 20 %. L'équation simplifiée donnerait ceci :

$$CA = \sum_{x=1}^4 Zscore_{cx} \times PIndicateur_{cx} \times Efficacité_{cx} \times Pondération_{cx} \times 2,18$$

$$CA = 20 \% \times 2,18 \left(\left(0,442 \times \frac{1}{5} \times 1,25 \right) + \left(0,414 \times \frac{1}{3} \times 1,25 \right) + \left(0,155 \times \frac{1}{3} \times 0,125 \right) + \left(0,314 \times \frac{3}{3} \times 0,375 \right) \right)$$

$$CA = 0,18$$

Ce qui donne un calcul de vulnérabilité de :

$$V = S - CA$$

$$V = 1,207 - 0,18$$

$$V = 1,03$$

Ainsi, cette mesure permettrait de réduire la vulnérabilité d'une classe selon l'échelle de la sensibilité (de moyenne à faible). Plusieurs critiques peuvent être émises contre cette méthode. D'une part, celle-ci est hautement subjective et ne se base sur aucune littérature solide, puisque cette dernière n'existe pas pour l'instant. D'autre part, l'estimation est vraiment grossière, car l'impact réel de l'indicateur dans la composante n'est pas forcément équivalent à une fraction de 3 ou de 5.

De plus, ce calcul est absolu, alors que la sensibilité est relative. En l'absence d'un registre de mesures d'adaptation, il est impossible de concevoir une appréciation relative de la capacité d'adaptation. Par contre, même si un tel registre existait, les réalités différentes d'une région à l'autre rendraient pratiquement impensable une méthode qui repose sur un score Z. Enfin, l'équation est complexe pour un décideur qui ne maîtrise pas les concepts de sensibilité, de vulnérabilité et de capacité d'adaptation.

Néanmoins, dans le contexte actuel, cette approche possède quelques points forts. En l'absence d'une littérature crédible, il est impératif de produire une mesure d'efficacité pour calculer un score final. Puisque les suivis sont trop souvent oubliés dans les actions, cette variable force le décideur à mettre en place un mécanisme de vérification de l'efficacité. De plus, cela empêche l'utilisation des mesures non ciblées. Par exemple, si la Ville de Magog calquait une mesure qui provenait de la Ville de Montréal concernant les immigrants ne parlant pas les langues officielles, celle-ci n'abaisserait pas la vulnérabilité, car cette réalité s'applique à 0 % de la population. Ainsi, il ne suffit pas de prendre une mesure adéquate ailleurs pour l'implanter dans la communauté visée, il faut s'assurer que cela répond à un besoin. Cette façon de procéder procure une rétroaction immédiate pour les gestionnaires qui pourront mieux cerner les ressources nécessaires à fournir aux régions dont ils sont responsables.

Ultimement, le chiffre produit par le calcul ne demeure qu'un simple chiffre. Les décideurs ne traitent pas des statistiques, ils protègent des populations. L'important de toute cette démarche est de favoriser la réflexion afin de mettre en place des stratégies optimales. L'incertitude qui entoure la valeur réelle de chaque capacité d'adaptation ne doit pas constituer un frein à l'action.

7. RECOMMANDATIONS POUR L'INTÉGRATION D'UN CALCUL DE VULNÉRABILITÉ À UN PLAN D'ADAPTATION SOUS L'ANGLE DE LA SANTÉ PUBLIQUE

Les chapitres précédents ont clairement démontré la complexité à établir un calcul de vulnérabilité. Les recommandations se déclinent sous trois angles. Le premier guide les organisations qui souhaitent utiliser une méthode déjà conçue. Le deuxième s'adresse à celles qui aimeraient adapter l'équation à leurs besoins et le dernier concerne les zones qui nécessitent des éclaircissements par les chercheurs.

7.1 Recommandations pour les organisations qui désirent utiliser un calcul déjà établi

Les chapitres 2 à 6 ont dégagé trois méthodes afin de déterminer la vulnérabilité, soit la production de matrices, l'utilisation de la démarche décrite par les chercheurs de l'Atlas de la vulnérabilité et la technique suggérée par le présent essai. Chacune d'entre elles possède des forces et des faiblesses qui sont détaillées au tableau 7.1, puis expliquées dans les paragraphes suivants.

Tableau 7.1 Comparaison de trois méthodes différentes pour intégrer un calcul de vulnérabilité dans un plan d'adaptation

	Matrices	Atlas de la vulnérabilité	Présent essai
1) Portée	Locale	Provinciale	Provinciale
2) Niveau de précision du calcul	Régional	Aire de diffusion	Aire de diffusion
3) Type de données	Qualitatives	Quantitatives	Quantitatives
4) Calcul de la capacité à faire face	Oui	Oui	Oui
5) Calcul de la capacité d'adaptation	Oui	Non	Oui
6) Flexibilité de la méthode	Élevée	Faible	Élevée
7) Ressources humaines et financières requises	Moyennes	Faibles	Élevées
8) Complexité de la méthode	Moyenne	Faible	Élevée
9) Niveau d'incertitude du calcul	Élevé	Moyen	Moyen
10) Facilité d'intégration à un plan d'adaptation	Moyenne	Moyenne	Élevée
11) Aléas applicables	Tous	Vagues de chaleur et inondations	Exemple avec vagues de chaleur, mais s'applique à tous les aléas en adaptant les indicateurs

1) La portée d'une matrice s'étend à la zone étudiée et ne permet pas la comparaison entre différents territoires, puisque diverses méthodes sont utilisées. Les deux autres approches produisent un portrait provincial très rapidement, ce qui facilite les comparaisons entre les régions grâce au score Z qui repose sur des indicateurs communs.

2) Les matrices sont produites pour une région et ne font pas de différences entre les divers quartiers, tandis que les deux autres méthodes atteignent une précision de l'ordre des aires de diffusion qui abritent entre 400 à 700 personnes.

3) Les matrices sont généralement générées à partir de données qualitatives qui reposent sur l'avis d'experts ou d'employés municipaux, ce qui rend la démarche extrêmement subjective. Les deux autres méthodes s'appuient sur des données du recensement de Statistique Canada, ce qui augmente l'objectivité de ces approches. Cependant, le choix de pondérer l'équation ou non, ainsi que la technique de regroupement des données demeurent subjectifs.

4) Les trois méthodes calculent la capacité à faire face, il suffit de sélectionner les indicateurs désirés. Ainsi, il est possible d'obtenir un portrait de la situation actuelle de la vulnérabilité, peu importe l'approche préconisée.

5) Le calcul de la capacité d'adaptation, bien qu'il soit possible en théorie, n'a pas été effectué par les chercheurs de l'Atlas de la vulnérabilité. Ces derniers ont préféré ne rien mettre en l'absence d'une littérature adéquate sur le sujet. (Barrette et al., 2018a) Les deux autres méthodes permettent de l'estimer, mais ces approches ne sont pas très solides d'un point de vue scientifique et servent plutôt à conscientiser les décideurs sur les éléments importants à considérer.

6) Puisque l'Atlas de la vulnérabilité est déjà bâti, la méthode ne peut pas être altérée grandement. Il est à noter qu'il est possible de manipuler les différentes couches et les tables attributaires disponibles en ligne, mais le calcul ne peut pas être refait facilement pour intégrer des indicateurs supplémentaires. (Barrette et al., 2020) Les deux autres approches consistent à remplir un canevas vide à l'aide de principes directeurs, ce qui confère une flexibilité illimitée.

7) L'Atlas de la vulnérabilité ne requiert pratiquement aucune ressource et peut s'utiliser instantanément. Les matrices se produisent dans des délais raisonnables selon leur niveau de complexité. L'approche du

présent essai, bien qu'aisément réalisable par une seule personne, demande tout de même plus de temps que les deux autres méthodes.

8) La méthode du présent essai demande une maîtrise du concept de la vulnérabilité, ainsi qu'une compréhension de base en géomatique et en statistique, ce qui rend la technique plus complexe que les deux autres approches. Malgré la relative simplicité des matrices, l'Atlas de la vulnérabilité est l'outil qui nécessite le moins de connaissances pour être utilisé.

9) Puisque les matrices sont extrêmement subjectives, cette technique détient le plus grand niveau d'incertitude. Les deux autres approches, bien qu'elles reposent sur une méthodologie scientifique rigoureuse, ne bénéficient pas encore de suffisamment de données de mortalité et de morbidité pour pouvoir être comparées et validées. Ainsi, il faudra attendre plus de recherches afin de diminuer le niveau d'incertitude relié à ces approches.

10) Les matrices sont faciles à intégrer à un plan d'adaptation, mais leur faible précision rend les mesures d'adaptation très vagues et peu ciblées. En ce qui concerne l'Atlas de la vulnérabilité, puisque les utilisateurs ne contrôlent pas les indicateurs et qu'il n'existe aucun outil pour calculer la capacité d'adaptation, il peut être difficile d'arrimer les stratégies avec la carte existante. L'approche du présent essai permet de façonner sur mesure des indicateurs afin de s'ajuster aux besoins de chaque plan d'adaptation. Cependant, cela se fait au prix d'une complexité plus élevée et la méthode se bute au manque de littérature étoffée sur le sujet.

11) L'Atlas de la vulnérabilité a effectué la démarche pour les vagues de chaleur et les inondations. Le présent essai a illustré le concept avec les vagues de chaleur, mais il est possible d'effectuer une démarche identique pour tous les types d'aléas en adaptant les indicateurs, tout comme pour les matrices.

À la lueur de toutes ces considérations, le choix de l'une ou l'autre de ces approches dépendra des ressources et des besoins des utilisateurs.

La matrice sied bien aux organisations qui désirent une méthode flexible et adaptée à leur réalité locale, tout en nécessitant peu d'investissements. Ce n'est pas sans raison que cette méthode prévaut dans la majorité des exemples cités au chapitre 2. Cependant, son faible niveau de précision rend cette démarche très sommaire et complexifie la prise de mesures ciblées selon les réalités des différents quartiers.

Le calcul du présent essai est plus flexible que toutes les autres solutions, mais demande plus de temps et de ressources à mettre en place. Ainsi, puisqu'il est impossible de démontrer sans équivoque la supériorité de cette approche pour les vagues de chaleur en l'absence de suffisamment de données probantes, l'investissement de temps et de ressources humaines ne vaut pas la peine dans tous les cas.

Par conséquent, considérant le peu de ressources de la majorité des organisations et l'absence d'une littérature claire qui permet à une méthode de se démarquer d'une autre, l'Atlas de la vulnérabilité semble le meilleur outil pour les vagues de chaleur et les inondations. La raison de son usage limité réside dans sa nouveauté. D'ici quelques années, son utilisation devrait se répandre. Cette approche clé en main et disponible en ligne ne requiert aucune démarche supplémentaire pour calculer la vulnérabilité actuelle. Cependant, la capacité d'adaptation n'est pas prise en compte et la détermination des classes de sensibilité et de vulnérabilité demeure une question en suspens. Ainsi, il sera primordial de suivre la progression de la littérature scientifique sur ce sujet, puisque l'équation et ses variables seront appelées à évoluer avec l'amélioration des connaissances.

Dans l'attente d'une plus grande abondance de données probantes, il est tout de même possible d'agir en limitant les risques d'investissements. Les mesures consensuelles d'adaptation de type « sans regret » avec de nombreux co-bénéfices devraient être priorisées, comme la végétalisation des espaces urbains et la consolidation du tissu social.

7.2 Recommandations pour les organisations qui désirent produire leur propre calcul

Cette section résume les étapes essentielles pour se lancer dans un calcul de sensibilité et de vulnérabilité afin de l'intégrer dans un plan d'adaptation aux changements climatiques dans l'éventualité où l'Atlas de la vulnérabilité ne répondrait pas aux besoins précis d'une organisation.

1. Sécuriser les ressources pour rédiger le plan d'adaptation et effectuer le suivi pour implanter des mesures concrètes. Par la suite, déterminer les aléas qui affectent le territoire actuel. Le chapitre 1 permet de se familiariser avec la terminologie et la section 2.1 détaille la procédure pour s'assurer que le calcul de vulnérabilité s'intègre bien au plan d'adaptation. Des exemples concrets sont offerts dans les sections 2.2 et 2.3 pour le milieu municipal. Le chapitre 3 revoit les concepts sous l'angle de la santé publique.

2. Identifier les indicateurs pertinents de sensibilité et de capacité à faire face pour l'aléa choisi, ainsi que les indicateurs de suivi comme décrit au chapitre 5. Les sous-sections 5.1 à 5.5 illustrent l'exemple des vagues de chaleur, mais la démarche fonctionne pour tous les types d'aléas.
3. Effectuer l'analyse de la sensibilité avec une ACP comme décrit à la section 6.1, et cartographier le résultat avec un SIG en s'inspirant de la section 6.2. Le chapitre 4 approfondit les concepts mathématiques derrière cette approche. Il est possible de pondérer l'équation ou de regrouper les données selon une méthode différente que les quintiles, mais aucune étude ne permet d'émettre des recommandations fortes dans un sens ou dans l'autre comme démontré à la section 6.3.
4. Arrimer l'analyse de la sensibilité actuelle avec les mesures d'adaptation sélectionnées. Calculer la vulnérabilité pour estimer l'impact des actions. La relation étroite entre les deux composantes facilite le suivi et la réévaluation des résultats sur une base commune comme expliqué à la section 6.4.
5. Rester à l'affût de la littérature scientifique et mesurer périodiquement l'efficacité des stratégies adoptées. Avec l'évolution rapide des connaissances, le plan établi devra être ajusté fréquemment.

7.3 Recommandations pour les chercheurs afin d'approfondir les connaissances

Tout au long de cet essai, le manque de données probantes a été soulevé comme un enjeu majeur. Les prochains paragraphes résument les zones d'ombre qui devront être éclaircies par les chercheurs afin d'appuyer les actions des décideurs.

- 1) Définir des indicateurs et des seuils fiables de sensibilité. En effet, seuls des avis d'experts et des études avec une faible puissance statistique sont disponibles pour évaluer la sensibilité. Par exemple, les seuils d'âges sensibles ne sont pas clairement démontrés. En l'absence de validation avec des données suffisantes de mortalité ou de morbidité, on ne peut que dégager des tendances sur ces divers aspects.
- 2) Établir des mesures de l'efficacité des stratégies d'adaptation et de capacité à faire face. Ce point est analogue à celui de la sensibilité. En l'absence de données précises, il est impossible de déterminer quelles approches méritent une plus grande attention.

3) Les deux questions précédentes répondront aux autres interrogations qui ont été soulevées tout au long de cet essai concernant la meilleure méthode de regroupement des données (*Jenks Natural Breaks*, quintile, etc.), ainsi que la pertinence de pondérer ou non l'équation finale.

CONCLUSION

Le concept de la vulnérabilité et les définitions qui l'accompagnent évoluent dans le temps. L'équation retenue pour cet essai est $V = S - CA$, où V est la vulnérabilité, S la sensibilité et CA la capacité d'adaptation. Un tour d'horizon des divers plans d'adaptation municipaux a souligné l'utilisation des matrices pour effectuer ce calcul. Des exemples qui proviennent du domaine de la santé ont démontré une approche différente pour obtenir des résultats plus précis qu'une simple matrice, soit le recours aux systèmes d'information géographique et à une analyse en composante principale.

L'étude de cette méthode dans cet essai a soulevé plusieurs questionnements, notamment à propos des indicateurs reliés à la vulnérabilité, à la technique de regroupement des données ainsi qu'à la pondération de l'équation finale. Afin d'éclaircir ces concepts, plusieurs analyses ont été effectuées. Le présent essai a développé une méthode avec 14 indicateurs de sensibilité divisés en 4 composantes qui sont pondérées. Les résultats sont regroupés par la méthode du *Jenks Natural Breaks*. La capacité d'adaptation se base sur une équation générale qui lie les indicateurs de sensibilité et leurs impacts sur la communauté. Cette approche a été comparée avec celle de l'équipe de chercheurs de l'Université Laval qui a conçu l'Atlas de la vulnérabilité. Leur méthode repose sur 13 indicateurs de sensibilité divisés en 4 composantes qui ne sont pas pondérées. Les résultats sont regroupés par la méthode des quintiles. La capacité à faire face se base sur 7 indicateurs qui sont divisés en 2 composantes.

Malheureusement, le manque de données probantes complexifie l'élaboration d'un calcul standardisé. Ainsi, en l'absence d'une relation claire entre la mortalité, la morbidité et les divers indicateurs de la vulnérabilité, il est impossible de déterminer une approche optimale.

Des recommandations ont été émises pour les organisations qui souhaitent employer ce calcul afin de l'intégrer à leur plan d'adaptation. L'utilisation de l'Atlas de la vulnérabilité qui est un outil clé en main constitue un excellent point de départ. Les différentes étapes à suivre pour ceux qui désirent adapter l'équation à leur réalité ont été énumérées. Enfin, des pistes de réflexion pour les chercheurs ont été précisées afin de pallier le manque de connaissance qui empêche de tirer des conclusions claires sur la meilleure méthode à adopter pour intégrer les considérations de santé publique aux plans d'adaptation.

Nonobstant ces obstacles, il demeure primordial que les politiciens et les gestionnaires agissent rapidement à l'égard de la santé publique et des changements climatiques. L'absence d'une littérature sans équivoque ne saurait être un prétexte à l'inaction. Les avis d'experts soulignés tout au long de cet

essai demeurent valides et les tendances observées justifient des investissements et des interventions substantiels. Il est possible de débiter par des stratégies de type « sans regret » qui comportent de multiples co-bénéfices et très peu de risques. De plus, un suivi étroit des différentes mesures mises en place permettra aux décideurs d'optimiser et de réajuster leur approche au besoin. Les fondements sont solides, il ne reste plus qu'à bâtir des communautés plus résilientes pour affronter avec succès les nombreux défis que posent les changements climatiques pour les générations actuelles et futures.

RÉFÉRENCES

- Agence nationale de Santé Publique (ANSP). (2017). *Plan National Canicule 2017*. Repéré à https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnc_actualise_2017.pdf
- Aguert, M. et Capel, A. (2018). Mieux comprendre les scores z pour bien les utiliser. *Rééducation Orthophonique*, 274, 61-85.
- Albers, R. A. W., Bosch, P. R., Blocken, B., Van Den Dobbelsteen, A. A. J. F., Van Hove, L. W. A., Spit, T. J. M.,...Rovers, V. (2015). Overview of challenges and achievements in the climate adaptation of cities and in the Climate Proof Cities program. *Building and Environment*, 83, 1-10.
- Austin, S., Ford, J., Berrang-Ford, L., Araos, M., Parker, S. et Fleury, M. (2015). Public health adaptation to climate change in Canadian jurisdictions. *International journal of environmental research and public health*, 12(1), 623-651.
- Barrette, N., Vandermissen, M-H., Roy, F., Mercier, G., Brousseau, Y., Berthold, E., Guilbert, É. et Lalonde, B. (2018a). *Atlas web de la vulnérabilité de la population québécoise aux aléas climatiques : Rapport de recherche*. Repéré à : <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportBarrette2018.pdf>
- Barrette, N., Vandermissen, M-H., Roy, F., Mercier, G., Brousseau, Y., Berthold, E., Guilbert, É. et Lalonde, B. (2018b). *Atlas de la vulnérabilité*. Repéré à <https://atlas-vulnerabilite.ulaval.ca/>
- Barrette, N., Vandermissen, M-H., Roy, F., Mercier, G., Brousseau, Y., Berthold, E., Guilbert, É. et Lalonde, B. *Atlas de la vulnérabilité [document cartographique] 2018c. utilisation de l'indice de sensibilité à la chaleur*. <https://services2.arcgis.com/RkhyeW7cqOfSjIQG/arcgis/rest/services/VaguesDeChaleur/FeatureServer> (1er mars 2020).
- Bateson, T. F. et Schwartz, J. (2007). Children's response to air pollutants. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 71(3), 238-243.
- Bouchama, A., Dehbi, M., Mohamed, G., Matthies, F., Shoukri, M. et Menne, B. (2007). Prognostic factors in heat wave-related deaths: a meta-analysis. *Archives of internal medicine*, 167(20), 2170-2176.
- Bro, R., & Smilde, A. K. (2014). Principal component analysis. *Analytical Methods*, 6(9), 2812-2831.
- Brooks, N. (2003). Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper*, 38(38), 1-16.
- Brown, J. D. (2009). Statistics Corner. Questions and answers about language testing statistics: Choosing the right number of components or factors in PCA and EFA. *Shiken: JALT Testing & Evaluation SIG Newsletter*, 13(2), 19-23.
- Całka, B. (2018). Comparing continuity and compactness of choropleth map classes. *Geodesy and Cartography*, 67.
- Canoui-Poitrine, F., Cadot, E. et Spira, A. (2006). Excess deaths during the August 2003 heat wave in Paris, France. *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, 54(2), 127-135.

- Cardona, O.D., van Aalst, M.K., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Perez, R.,...Sinh, B.T. (2012). Determinants of risk: Exposure and vulnerability. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* (p. 65-108). New York, NY : Cambridge University Press.
- Casanueva, A., Burgstall, A., Kotlarski, S., Messeri, A., Morabito, M., Flouris, A. D.,...Schwierz, C. (2019). Overview of existing heat-health warning systems in Europe. *International journal of environmental research and public health*, 16(15), 2657.
- Cascone, S., Catania, F., Gagliano, A. et Sciuto, G. (2018). A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. *Building and Environment*, 136, 227-239.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2015). *Assessing health vulnerability to climate change: A guide for health departments*. Repéré à <https://www.cdc.gov/climateandhealth/pubs/AssessingHealthVulnerabilitytoClimateChange.pdf>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2017). *Climate and health intervention assessment: Evidence on public health interventions to prevent the negative health effects of climate change*. Repéré à https://www.cdc.gov/climateandhealth/docs/ClimateAndHealthInterventionAssessment_508.pdf
- Centre intégré de santé et de services sociaux de Laval. (2019). *Rapport d'enquête épidémiologique : vague de chaleur de l'été 2018*. Repéré à http://www.lavalensante.com/fileadmin/internet/cisss_laval/Documentation/Sante_publique/Rapports_et_memoires/2019/Rapport_vague_de_chaleur_2018_Laval_final_2019-05-29__2_.pdf
- Chakraborty, S., Nagwani, N. K. et Dey, L. (2014). Performance comparison of incremental k-means and incremental dbSCAN algorithms. *arXiv preprint arXiv:1406.4751*.
- Chen, C., Doherty, M., Coffee, J., Wong, T. et Hellmann, J. (2016). Measuring the adaptation gap: A framework for evaluating climate hazards and opportunities in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 66, 403-419.
- City of Barrie. (2017). *Climate Change Adaptation Strategy*. Repéré à <https://www.barrie.ca/Living/Environment/Conservation/Documents/Barrie-Climate-Change-Adaptation-Strategy.pdf>
- City of Edmonton. (2018). *Climate Resilient Edmonton: Adaptation Strategy and Action Plan*. Repéré à https://www.edmonton.ca/city_government/documents/Climate_Resilient_Edmonton.pdf
- City of Vancouver. (2012). *Climate Change Adaptation Strategy*. Repéré à <https://vancouver.ca/files/cov/Vancouver-Climate-Change-Adaptation-Strategy-2012-11-07.pdf>
- Connelly, A., Carter, J., Handley, J. et Hincks, S. (2018). Enhancing the practical utility of risk assessments in climate change adaptation. *Sustainability*, 10(5), 1399.
- Dahl, R. (2013). Cooling concepts: Alternatives to air conditioning for a warm world. *Environmental Health Perspectives*, 121(1).
- de Almeida I. Q., Welle, T. et Birkmann, J. (2016). Disaster risk indicators in Brazil: A proposal based on the world risk index, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 17(2016): 251-272.
- Données Québec. (2012). Îlots de chaleur/fraicheur urbains et température de surface 2012. Repéré à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/ilots-de-chaleur-fraicheur-urbains-et-temperature-de-surface>

- Dray, S. et Josse, J. (2015). Principal component analysis with missing values: a comparative survey of methods. *Plant Ecology*, 216(5), 657-667.
- Ebi, K., Anderson, V., Berry, P. et Yusa, A. (2016). *Ontario climate change and health vulnerability and adaptation assessment guidelines: technical document*. Repéré à http://www.health.gov.on.ca/en/common/ministry/publications/reports/climate_change_toolkit/climate_change_toolkit.pdf
- Eisenman, D. P., Wilhalme, H., Tseng, C. H., Chester, M., English, P., Pincetl, S.,...Dhaliwal, S. K. (2016). Heat Death Associations with the built environment, social vulnerability and their interactions with rising temperature. *Health & place*, 41, 89-99.
- Ghasemi, A. et Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *International journal of endocrinology and metabolism*, 10(2), 486.
- Giguère, M. (2009). *Literature Review of Urban Heat Island Mitigation Strategies*. Repéré à : https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1513_UrbanHeatIslandMitigationStrategies.pdf
INSPQ
- Guillard-Gonçalves, C., Cutter, S. L., Emrich, C. T. et Zêzere, J. L. (2015). Application of social vulnerability index (SoVI) and delineation of natural risk zones in Greater Lisbon, Portugal. *Journal of Risk Research*, 18(5), 651-674.
- Harlan, S. L., Declet-Barreto, J. H., Stefanov, W. L. et Petitti, D. B. (2013). Neighborhood effects on heat deaths: social and environmental predictors of vulnerability in Maricopa County, Arizona. *Environmental health perspectives*, 121(2), 197-204.
- Health Canada. (2012). *Heat alert and response systems to protect health: Best practices guidebook*. Repéré à https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/pdf/pubs/climat/response-intervention/response-intervention-eng.pdf
- Hondula, D. M., Davis, R. E., Leisten, M. J., Saha, M. V., Veazey, L. M. et Wegner, C. R. (2012). Fine-scale spatial variability of heat-related mortality in Philadelphia County, USA, from 1983-2008: a case-series analysis. *Environmental Health*, 11(1), 16.
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2010). *Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés à la chaleur*. Repéré à https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1079_IndicateursVigieSanteChaleur.pdf
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2015). *Médicaments et effets indésirables : recommandations cliniques en périodes de canicule*. Repéré à https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2036_medicaments_effets_canicule.pdf
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2017a). *Analyse des impacts des vagues régionales de chaleur extrême sur la santé au Québec de 2010 à 2015*. Repéré à : https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2221_impacts_vagues_chaleur_extreme_sante.pdf
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2017b). *Évaluation de la performance des avertissements de chaleur extrême émis par le système SUPREME au Québec de 2010 à 2016*. Repéré à : https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2291_evaluation_performance_avertissement_chaleur_supreme.pdf
- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2019a). *L'indice de défavorisation matérielle et sociale : en bref*. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/santescope/indice-defavorisation/guidemethodologiquefr.pdf>

- Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). (2019b). Surveillance des impacts des vagues de chaleur extrême sur la santé au Québec à l'été 2018. Repéré à : <https://www.inspq.qc.ca/bise/surveillance-des-impacts-des-vagues-de-chaleur-extreme-sur-la-sante-au-quebec-l-ete-2018>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.
- Jayalakshmi, T. et Santhakumaran, A. (2011). Statistical normalization and back propagation for classification. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 3(1), 1793-8201.
- Jolliffe, I. T. et Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202.
- Jung, Y. G., Kang, M. S. et Heo, J. (2014). Clustering performance comparison using K-means and expectation maximization algorithms. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 28(sup1), S44-S48.
- Kajekar, R. (2007). Environmental factors and developmental outcomes in the lung. *Pharmacology & therapeutics*, 114(2), 129-145.
- Khan, F. (2012). An initial seed selection algorithm for k-means clustering of georeferenced data to improve replicability of cluster assignments for mapping application. *Applied Soft Computing*, 12(11), 3698-3700.
- Kovats, R. S. et Hajat, S. (2008). Heat stress and public health: a critical review. *Annu. Rev. Public Health*, 29, 41-55.
- Kwak, S. G. et Kim, J. H. (2017). Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics. *Korean journal of anesthesiology*, 70(2), 144.
- Lee, B. (2018). Varimax rotation and thereafter: Tutorial on PCA using linear algebra, visualization, and python programming for R and Q analysis. *연구방법논총*, 3(1), 79-130.
- Levison, M., Whelan, M. et Butler, A. (2017) *A changing climate: Assessing health impacts and vulnerabilities due to climate change within Simcoe Muskoka*. Repéré à <http://www.simcoemuskokahealth.org/docs/default-source/topic-environment/smdhu-vulnerability-assessment-2017-finale1e3e25f97be6bc38c2dff0000a8dfd8.pdf?sfvrsn=0>
- Levison, M., Butler, A., Rebellato, S., Armstrong, B., Whelan, M. et Gardner, C. (2018). Development of a climate change vulnerability assessment using a public health lens to determine local health vulnerabilities: An Ontario health unit experience. *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2237.
- Linux Mint Team. (2020). Linux Mint version 19.3. Repéré à <https://www.linuxmint.com/>

- Lundgren-Kownacki, K., Hornyanszky, E. D., Chu, T. A., Olsson, J. A. et Becker, P. (2018). Challenges of using air conditioning in an increasingly hot climate. *International journal of biometeorology*, 62(3), 401-412.
- MacNee, W., Rabinovich, R. A. et Choudhury, G. (2014). Ageing and the border between health and disease. *European Respiratory Journal*, 44, 1332-1352.
- Mayrhuber, E. A. S., Dückers, M. L., Wallner, P., Arnberger, A., Alex, B., Wiesböck, L.,...Kutalek, R. (2018). Vulnerability to heatwaves and implications for public health interventions—A scoping review. *Environmental research*, 166, 42-54.
- Mazari, M., Tirado, C., Nazarian, S. et Aldouri, R. (2017). Impact of geospatial classification method on interpretation of intelligent compaction data. *Transportation Research Record*, 2657(1), 37-46.
- McPherson, M., Ji, H., Hunt, J., Ranger, R. et Gula, C. (2012). Medication use among Canadian seniors. *Healthcare Quarterly (Toronto, Ont.)*, 15(4), 15-18.
- Mees, H. L., Driessen, P. P. et Runhaar, H. A. (2015). "Cool" governance of a "hot" climate issue: public and private responsibilities for the protection of vulnerable citizens against extreme heat. *Regional environmental change*, 15(6), 1065-1079.
- Ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS). (2019). *Plan ministériel de gestion des épisodes de chaleur extrême*. Repéré à : <https://publications.msss.gouv.qc.ca/msss/fichiers/2019/19-269-09W.pdf>
- Ministère de la Sécurité publique. (2008a). *Concepts de base en sécurité civile*. Repéré à https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/publications/concepts_base/concepts_base.pdf
- Ministère de la Sécurité publique. (2008b). *Gestion des risques en sécurité civile*. Repéré à https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/publications/gestion_risques/gestion_risques.pdf
- Murayama, H., Fujiwara, Y. et Kawachi, I. (2012). Social capital and health: a review of prospective multilevel studies. *Journal of epidemiology*, 1203140304-1203140304.
- Nayak, S. G., Shrestha, S., Kinney, P. L., Ross, Z., Sheridan, S. C., Pantea, C. I.,...Hwang, S. A. (2018). Development of a heat vulnerability index for New York State. *Public Health*, 161, 127-137.
- OpenStreetMap (OSM) contributors. OpenStreetMap [document cartographique] 2020. utilisation de openstreetmap. <https://www.openstreetmap.org> (1er mars 2020)
- Oppenheimer, M., Campos, M., Warren, R., Birkmann, J., Luber, G., O'Neill, B. et Takahashi, K. (2014). Emergent risks and key vulnerabilities. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* (p. 1039-1099). New York, NY : Cambridge University Press.
- Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2015). *Protéger la santé face au changement climatique: évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation*. Repéré à https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/151810/9789242564686_fre.pdf;jsessionid=903EF68040734F5B2B5B2D27E56CF1B?sequence=1
- Ouranos. (2010). *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques : guide destiné au milieu municipal québécois*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/climat-municipalites2/Plan-adaptation.pdf>

- Ouranos. (2015). *Vers l'adaptation : synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/SyntheseRapportfinal.pdf>
- Pampalon, R. et Raymond, G. (2003). Indice de défavorisation matérielle et sociale : son application au secteur de la santé et du bien-être, *Santé, société et solidarité*, 1: 190-207.
- Price, K., Perron, S. et King, N. (2013). Implementation of the Montreal heat response plan during the 2010 heat wave. *Canadian Journal of Public Health*, 104(2), e96-e100.
- Python Core Team. (2020). Python version 3.8. Repéré à <https://www.python.org/>
- QGIS Development Team. (2019). QGIS Geographic Information System [logiciel]. Version 3.10.0, Open Source Geospatial Foundation
- R Core Team. (2020). R version 3.6.2. Repéré à <https://www.r-project.org/>
- Reid, C. E., O'Neill, M. S., Gronlund, C. J., Brines, S. J., Brown, D. G., Diez-Roux, A. V. et Schwartz, J. (2009). Mapping community determinants of heat vulnerability. *Environmental health perspectives*, 117(11), 1730-1736.
- Reid, C. E., Snowden, J. M., Kontgis, C. et Tager, I. B. (2012). The role of ambient ozone in epidemiologic studies of heat-related mortality. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1627-1630.
- Richardson, G. R. A. (2010). *S'adapter aux changements climatiques : une introduction à l'intention des municipalités canadiennes*. Repéré à https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/mun_f.pdf
- Santé publique de l'Estrie. (2016). *Changements climatiques : qu'en est-il des risques pour la santé des Estriens*. Repéré à https://www.santeestrie.qc.ca/clients/CIUSSSE-CHUS/medias-publications/publication/bulletin/vision-sante-publique/2016/30_Vision_sante_publique_Changements_climatiques.pdf
- Service Nova Scotia and Municipal relations. (2011). *Municipal climate change action plan guidebook*. Repéré à <https://beta.novascotia.ca/sites/default/files/documents/1-1396/municipal-climate-change-action-plan-guidebook-en.pdf>
- Shafique, M., Kim, R. et Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 757-773.
- Shariff, N., Aleem, A., Singh, M., Z Li, Y. et J Smith, S. (2012). AF and Venous Thromboembolism - Pathophysiology, Risk Assessment and CHADS-VASc score. *Journal of atrial fibrillation*, 5(3), 649.
- Sharma, J. et Ravindranath, N. H. (2019). Applying IPCC 2014 framework for hazard-specific vulnerability assessment under climate change. *Environmental Research Communications*.
- Sheffield, P. E., Herrera, M. T., Kinnee, E. J. et Clougherty, J. E. (2018). Not so little differences: Variation in hot weather risk to young children in New York City. *Public health*, 161, 119-126.
- Smith, L. I. (2002). *A tutorial on principal components analysis*. Repéré à : http://www.iro.umontreal.ca/~pift6080/H09/documents/papers/pca_tutorial.pdf
- Smith, R. M. (1986). Comparing traditional methods for selecting class intervals on choropleth maps. *The Professional Geographer*, 38(1), 62-67.
- Solé-Auró, A., Michaud, P. C., Hurd, M. et Crimmins, E. (2015). Disease incidence and mortality among older Americans and Europeans. *Demography*, 52(2), 593-611.

- Statistique Canada (2016a) Recensement 2016 [fichier d'ordinateur]. Produit no 98-401-X2016044 au catalogue de Statistique Canada.
- Statistique Canada (2016b) Fichiers des limites des aires de diffusion du Recensement de 2016 [fichier d'ordinateur]. Produit no 92-169-X au catalogue de Statistique Canada.
- Statistique Canada. (2018a). Aire de diffusion : définition détaillée. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92-195-x/2011001/geo/da-ad/def-fra.htm>
- Statistique Canada. (2018b). Guide du Recensement de la population 2016. Repéré à <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/ref/98-304/98-304-x2016001-fra.pdf>
- Statistique Canada. (2019). Dictionnaire, recensement de la population 2016. Repéré à <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/ref/dict/index-fra.cfm>
- Stöllberger, C., Lutz, W. et Finsterer, J. (2009). Heat-related side-effects of neurological and non-neurological medication may increase heatwave fatalities. *European journal of neurology*, 16(7), 879-882.
- The Document Foundation. (2020). LibreOffice version 6.3.5. Repéré à <https://www.libreoffice.org/>
- Thomas, I., Bleau, N., Soto Abasolo, P., Desjardin-Dutil, G., Fuamba, M. et Kadi, S. (2012). *Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques en prenant comme cas d'étude la ville de Montréal*. Repéré à https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportThomasBleau2012_FR.pdf
- Trottier, A. (2008). Toitures végétales: implantation de toits verts en milieu institutionnel. *Étude de cas: UQAM. Montréal: Grip-UQAM/Verdis-toit, Centre d'écologie urbaine de Montréal*.
- Uddin, M. N., Islam, A. S., Bala, S. K., Islam, G. T., Adhikary, S., Saha, D.,...Akter, R. (2019). Mapping of climate vulnerability of the coastal region of Bangladesh using principal component analysis. *Applied geography*, 102, 47-57.
- Urban Land Institute (ULA). (2015). *A guide for assessing climate change risk*. Repéré à <http://americas.uli.org/wp-content/uploads/sites/2/ULI-Documents/ULI-A-Guide-for-Assessing-Climate-Change-Risk-final.pdf>
- Van de Ven, F. H., Snep, R. P., Koole, S., Brolsma, R., van der Brugge, R., Spijker, J. et Vergroesen, T. (2016). Adaptation Planning Support Toolbox: Measurable performance information based tools for co-creation of resilient, ecosystem-based urban plans with urban designers, decision-makers and stakeholders. *Environmental Science & Policy*, 66, 427-436.
- Vandentorren, S., Bretin, P., Zeghnoun, A., Mandereau-Bruno, L., Croisier, A., Cochet, C.,...Ledrans, M. (2006). August 2003 heat wave in France: risk factors for death of elderly people living at home. *The European Journal of Public Health*, 16(6), 583-591.
- Vanos, J. K. (2015). Children's health and vulnerability in outdoor microclimates: A comprehensive review. *Environment international*, 76, 1-15.
- Vergriete, Y. et Labrecque, M. (2007). *Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais*. Repéré à <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-pepinierie/documents/pdf891.pdf>
- Ville de Laval. (2016). *Plan d'adaptation aux changements climatiques*. Repéré à <https://www.laval.ca/Documents/Pages/Fr/Citoyens/environnement-recyclage-et-collectes/plan-adaptation-changements%20-climatiques.pdf>

- Ville de Montréal. (2015). *Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015 – 2020 : les constats*. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/enviro_fr/media/documents/paccam_2015-2020_lesconstats.pdf
- Ville de Montréal. (2017). *Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015 – 2020 : les mesures d'adaptation*. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PACCAM_2015-020_LESMESURES.PDF
- Ville de Sherbrooke. (2013). *Plan d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020*. Repéré à https://www.ville.sherbrooke.qc.ca/fileadmin/fichiers/environnementsherbrooke.ca/Neutralisation/Plan_d_adaptation_aux_changements_climatiques_2013-2023.pdf
- Ville de Trois-Rivières. (2013). *Plan d'adaptation aux changements climatiques*. Repéré à https://glsicities.org/wp-content/uploads/2015/07/3riv-Plan_d_adaptationCC.pdf
- Warren, F.J. et Lemmen, D.S. (2014). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*. Repéré à https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/assess/2014/pdf/Rapport-complet_Fra.pdf
- Watts, N., Adger, W. N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W.,...Cox, P. M. (2015). Health and climate change: policy responses to protect public health. *The Lancet*, 386(10006), 1861-1914.
- Xu, Z., FitzGerald, G., Guo, Y., Jalaludin, B. et Tong, S. (2016). Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: a systematic review and meta-analysis. *Environment international*, 89, 193-203.
- Xu, Z., Sheffield, P. E., Su, H., Wang, X., Bi, Y. et Tong, S. (2014). The impact of heat waves on children's health: a systematic review. *International journal of biometeorology*, 58(2), 239-247.
- Zhu, Q., Liu, T., Lin, H., Xiao, J., Luo, Y., Zeng, W.,...Du, Y. (2014). The spatial distribution of health vulnerability to heat waves in Guangdong Province, China. *Global health action*, 7(1), 25051.
- Zhu, W., Zeng, N. et Wang, N. (2010). Sensitivity, specificity, accuracy, associated confidence interval and ROC analysis with practical SAS implementations, *NESUG proceedings: health care and life sciences, Baltimore, Maryland*, 19, 67.

ANNEXE 1 – FORMULES MATHÉMATIQUES (produit avec : Python, 2020)

Tous les calculs ont été produits à l'aide des bibliothèques scientifiques NumPy, Pandas, Matplotlib, Scikit-learn et SciPy disponibles avec Python 3.8. Les méthodes pour résoudre ces équations sont accessibles en ligne. L'annexe sert seulement à identifier le point de départ de la démarche.

PCA par décomposition en valeurs singulières

Équation	$X = USV^T$
Variables	X = La matrice de corrélation $m \times n$ U = Une matrice orthogonale $m \times n$ S = Une matrice diagonale $n \times n$ V = Une matrice orthogonale $n \times n$

Score Z

Équation	$ScoreZ = (X_i - \mu) / \sigma$
Variables	$ScoreZ$ = Score Z X_i = Valeur brute μ = Moyenne de l'ensemble des données σ = Écart-type de l'ensemble des données

Normalisation Min-Max

Équation	$ScoreZ_c = (x_c - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$
Variables	$ScoreZ_c$ = Score Z normalisé d'une aire de diffusion d'une composante c x_c = Valeur numérique brute d'une aire de diffusion d'une composante c x_{min} = Valeur minimum de l'ensemble des scores Z d'une composante c x_{max} = Valeur maximale de l'ensemble des scores Z d'une composante c

GVF

Équation
$GVF = 100 - \left(\frac{SSW}{SST} \right) \times 100$
Variables
<i>GVF</i> = Goodness of variance fit <i>SSW</i> = Sum of Squares Within (Somme de l'écart au carré à l'intérieur de la classe) <i>SST</i> = Sum of Squares Total (Somme de l'écart au carré pour l'ensemble des données)

ANNEXE 2 – CAPTURES D'ÉCRAN DES COUCHES GÉNÉRÉES AVEC QGIS (compilation d'après : Statistique Canada, 2016a; Statistique Canada, 2016b; QGIS, 2019; OSM, 2020)

